SCIENCES ET AVENIR

IA La fin du Web
p.42

LA NOUVELLE CONQUÊTE DE LA LUNE

p.28

Départ pour la mission Artemis II
avec Reid Wiseman, Victor Glover, Christina Koch
et Jeremy Hansen

L 13418 - 948 - F: 5,30 € - RD

PEUGEOT
NOUVELLE 308
PLACE AU LION

VERSION HYBRIDE

Dès **308€** /mois(1)

SANS APPORT

LLD 49 mois
Sous condition de reprise

JUSQU'À 8 ANS PEUGEOT CARE GARANTIE (2)

PEUGEOT RECOMMANDE **TotalEnergies** – Consommation mixte WLTP (l/100km) : 0

(1) Exemple pour une location longue durée (LLD) 49 mois/40 000 km d'une Nouvelle 308 Hybride STYLE neuve, hors option. Modèle présenté : Nouvelle E-308 GT sans option : **510€/mois** sans apport. Montants exprimés en TTC hors autres prestations facultatives. Offre non cumulable jusqu'au **31/03/26**, réservée particuliers, sous condition de reprise, valable pour toute commande auprès du réseau Peugeot participant. Sous réserve d'acceptation du dossier par CREDIPAR, loueur et SA au capital de 138.517.008 €, RCS Versailles n° 317 425 981 ORIAS 07004921 (www.orias.fr), 43 Rue Jean Pierre Timbaud 78300 Poissy. (2) Peugeot Care : voir conditions sur peugeot.fr. Automobile PEUGEOT 552 144 503 RCS Versailles.

Au quotidien, prenez les transports en commun. #SeDéplacerMoinsPolluer

Défendre la science, toujours

Qu'elle soit papier ou numérique, c'est une page qui se tourne. Il y a précisément 50 ans, l'industriel et homme de presse Claude Perdriel (*Le Nouvel Obs, Le Matin de Paris, Challenges…*) reprenait les rênes du magazine *Sciences et Avenir,* fondé en 1947 par Gérard Lefebvre, ancien résistant de tout juste 24 ans. Après des décennies vouées à ses journaux — la passion d'une vie —, Claude Perdriel vient de finaliser la vente de ses titres de presse. « *Avec vous j'ai défendu* Sciences et Avenir *pendant toutes ces années et j'en suis fier. Je continuerai à le lire et le suivrai fidèlement* », nous confie-t-il. C'est donc avec un nouvel actionnaire, LVMH, dirigé par Bernard Arnault, que notre équipe aborde l'année 2026. À l'heure aussi où la science est contestée, instrumentalisée, parfois niée, nous voulons vous dire, à vous lectrices et lecteurs, que l'esprit de ce collectif demeure inchangé. Notre équipe de journalistes produit le mensuel *Sciences et Avenir*, son trimestriel thématique, son quotidien sur le Web, le mook *La Recherche* et son site (acquis par Claude Perdriel en 2016), autant de contenus qui nourrissent aussi nos réseaux sociaux. Ce travail relève d'une forme de résistance au temps de confusion que nous traversons collectivement. Non, la science n'est pas une croyance. Elle respecte une méthode, la fameuse « démarche scientifique », qui consiste en une patiente et parfois laborieuse production de connaissance, où chaque étape fait l'objet de contrôles et de vérifications, l'également fameuse « validation par les pairs ». La science, c'est une grille de lecture du monde, sans parti pris ni dogme. La transmission qui s'opère aujourd'hui pour *Sciences et Avenir* et *La Recherche* traduit la continuité d'une même exigence : considérer la science comme une aventure humaine, collective, faite de doutes, de débats et de découvertes. Garants de cet héritage, nous vous assurons une indépendance éditoriale totale, une rigueur sans concession et des moyens renouvelés pour continuer à informer, expliquer et transmettre avec passion. ■

Il y a 50 ans, l'industriel et homme de presse Claude Perdriel reprenait les rênes de votre magazine…

Mathieu Nowak, rédacteur en chef de *Sciences et Avenir*
Philippe Pajot, rédacteur en chef de *La Recherche*
Olivier Lascar, rédacteur en chef du digital

SCIENCES ET AVENIR

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements: France, 1 an simple (11 numéros dont un double): 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries): 48 €. Étranger: nous consulter.
Abonnements Belgique: Edigroup: tél. 00.32.70.233.304
Abonnements Suisse: Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction:
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet: sciencesetavenir.fr

Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK - 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15
Rédaction en chef Les Dossiers Vincent REA - 01.55.35.56.35 avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32 Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52 Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31 Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59, Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28, Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Chef(fe)s de service Rachel FLÉAUX (MULOT) (environnement, évolution) - 01.55.35.56.07, Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46, Hervé RATEL (adjoint, actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78, Mathias GERMAIN (La Recherche, biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33, Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23 Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27 Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueur Jean-Gabriel GANASCIA
Ont participé à ce numéro : T. de BASTARD, J. BOUGHON, P. BOYER, L. CHABANI, C. COUMAU, H. d'HERCEVILLE, N. GUTIERREZ C., P. KALDY, H.-P. PENEL, Y. YAGISHITA
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Pôle digital Valentin COLLIAT-DANGIS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines William AFTHONIADES - wafthoniades@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Creatoprint
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable réabonnement Yasmina FERHAT - 01.55.35.56.64
Responsable du marketing direct Lina QUACH - 01.55.35.56.63
Partenariats et événements Alain SCEMAMA - 01.58.65.03.58
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél.: 01.44.88.97.70. Fax: 01.44.88.97.79
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directrice de publicité Caroline GILLES - 01.44.88.89.03
Exécution Émilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20

Les Éditions Croque Futur SAS au capital de 10 100 000 euros associé UFIPAR (LVMH) - 41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Président et directeur de la publication Maurice SZAFRAN

Ce magazine est imprimé chez RotoFrance, 25 rue de la Maison Rouge 77185 Lognes
Origine du papier: Allemagne - Taux de fibres recyclées: 0 % Eutrophisation: PTot = 0,018 kg/tonne de papier

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte : une lettre Sciences et Avenir « bienvenue aux abonnés » et un encart « First Voyages » posés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés, ainsi qu'un encart « Linvosges » posé sur couverture sur la totalité de la diffusion abonnés.
Commission paritaire n° 1126 K 79712.
ISSN 3040-0457. Distribué par MLP.

SOMMAIRE

Sciences et Avenir / N° 948 / Février 2026

DOSSIER P. 28

PROGRAMME ARTEMIS
Objectif Lune

Une première depuis 1972 ! Quatre astronautes doivent décoller en février pour un voyage autour de la Lune. « Sciences et Avenir » fait le point sur cet ambitieux programme de la Nasa qui devrait se poursuivre avec l'alunissage d'humains à partir de 2028.

P. 54

Face aux maladies, la forêt doit se réinventer

En France, la forêt souffre d'une invasion sans précédent d'insectes et de champignons ravageurs. Mais des solutions existent. Zoom sur six espèces d'arbres menacées.

P. 64

L'impression 3D pour une médecine de précision

La plateforme Prim3D des Hôpitaux de Paris produit des copies parfaites du corps humain pour préparer la pose de prothèses ou une chirurgie complexe, mais pas seulement. Panorama.

P. 78

Lavau : les trésors du prince celte

Une exposition présente pour la première fois le riche mobilier restauré de la tombe de Lavau. Il témoigne du statut très élevé du défunt dans la société celte du v[e] siècle avant notre ère...

3 **Édito**

ÉVÉNEMENT

6 **Les 10 découvertes de 2025**

SCIENCES FONDAMENTALES

10 **ACTUALITÉS** Le retour d'échantillons martiens annulé / Une exoplanète façonnée par un pulsar

26 **Journal de l'IA : Ces IA qui se prennent pour des chercheurs**

42 **La fin du Web ? Quand l'IA remodèle Internet**

47 **La revanche de la bande magnétique**

50 **Un scénario crédible pourrait expliquer l'étoile de Bethléem**

52 **La route électrique trace sa voie**

NATURE

14 **ACTUALITÉS** Tara à l'assaut des super-coraux / La chaleur, premier langage entre plantes et pollinisateurs

54 **Face aux maladies, la forêt doit se réinventer**

59 **L'homme qui a percé le langage des oiseaux**

62 **Comment l'Indonésie traque les tsunamis**

SANTÉ

18 **ACTUALITÉS** Les vaccins anti-Covid bénéfiques à long terme / Comment le cerveau se reconnecte

64 **Hôpital : l'impression 3D pour une médecine de précision**

69 **Un casque immersif guide le chirurgien**

72 **Des bactéries améliorent la santé mentale**

76 **Nutrition : Les bouillons reviennent en force**

HISTOIRE

22 **ACTUALITÉS** Au Maroc, des ancêtres de Sapiens et Neandertal / Quand des dinosaures s'essayaient à la nage

78 **Lavau : les trésors du prince celte**

83 **Peste noire : la piste de l'accident climatique**

86 **Histoire des sciences : Thomas Harriot à la conquête d'un nouveau monde**

RENDEZ-VOUS

90 **Sélection livres**

92 **Expositions**

94 **Questions de lecteurs**

95 **Courrier**

96 **Le ciel de février**

98 **À retrouver sur le Web**

BILL INGALLS / NASA / SIPA - MARC CHESNEAU / NATURAGENCY - FRANÇOIS GUENET/DIVERGENCE POUR SCIENCES ET AVENIR - ANNE MAIGRET/C2RMF X 2

Nouveau

Citroën C5 Aircross

à partir de 349€/mois(1)

LLD 49 mois / 40 000 km 1er loyer de 3 000 €

A 58g CO_2/km
B
C
D
E
F
G

JUSQU'À 8 ANS CITROËN, WE CARE GARANTIE

CITROËN préfère TotalEnergies Modèle présenté Nouveau C5 AIRCROSS Hybride rechargeable, 195ch, boîte automatique MAX avec options, 536 €/mois aux mêmes conditions. (1) Exemple pour une location longue durée (LLD) d'un Nouveau C5 Aircross Hybride 145ch boîte automatique YOU neuf, hors option. Offre non cumulable, réservée aux particuliers, valable jusqu'au 31/01/2026 auprès du réseau Citroën participant. Sous réserve d'acceptation du dossier par CREDIPAR, loueur et SA au capital de 138 517 008 €, RCS Versailles n° 317 425 981, ORIAS 07004921 (www.orias.fr), 43 Rue Jean Pierre Timbaud 78300 POISSY. We Care : voir détails sur citroën.fr.

CITROËN

AUTOMOBILES CITROËN : RCS PARIS 642 050 199

Pour les trajets courts, privilégiez la marche ou le vélo. #SeDéplacerMoinsPolluer

Les 10 découvertes de 2025

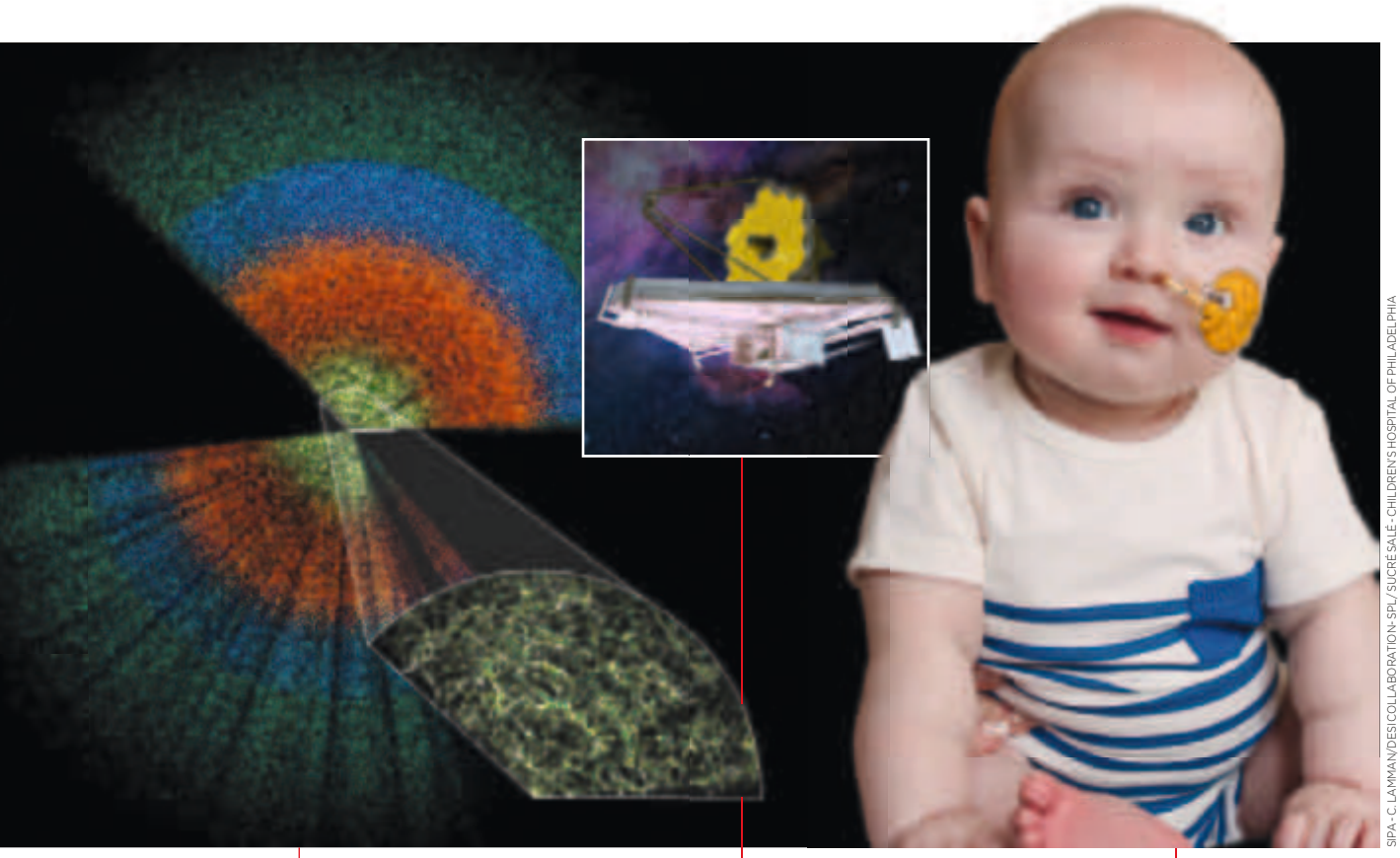
De la première thérapie génique sur mesure à la révélation du visage de l'homme de Denisova en passant par la découverte de la plus jeune galaxie de l'Univers, les avancées scientifiques ont jalonné l'année 2025. Voici une sélection des plus belles parues dans « Sciences et Avenir ».

Par la rédaction

FÉV.

DES SOURIS LAINEUSES EN ATTENDANT LE RETOUR DU MAMMOUTH

La société Colossal Biosciences a annoncé avoir créé des souris génétiquement modifiées présentant des traits de résistance au froid inspirés du mammouth laineux (*Mammuthus primigenius*). En modifiant sept gènes identifiés à partir de plus de 100 génomes de mammouths et d'éléphants, les chercheurs ont obtenu des rongeurs au pelage long, laineux et à la pigmentation modifiée, avec un métabolisme lipidique altéré. Cette avancée valide les outils d'édition génomique complexes indispensables à la renaissance du mammouth, but ultime de l'entreprise. Elle relance surtout le débat sur l'intérêt scientifique et éthique de la désextinction. **J. I.**



SIPA - C. LAMMAN/DESICOLLABORATION- SPL/ SUCRE SALÉ - CHILDREN'S HOSPITAL OF PHILADELPHIA

MARS

DESI FAIT PARLER L'ÉNERGIE NOIRE

Responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers, l'énergie noire ne serait pas constante au cours du temps. C'est ce que suggèrent les résultats de l'instrument Desi, installé à l'observatoire de Kitt Peak (États-Unis). En cartographiant des millions de galaxies sur plus de 11 milliards d'années d'histoire cosmique, il montre que l'effet de l'énergie noire aurait été plus intense par le passé qu'aujourd'hui, remettant en cause le modèle d'une constante cosmologique. Si l'on ignore toujours ce qu'est l'énergie noire, on commence ainsi à savoir ce qu'elle n'est pas. **F. N.**

AVRIL

UNE GALAXIE À L'AUBE DE L'UNIVERS

MoM-z14 (MoM pour Mirage or Miracle) a été observée par le télescope spatial James-Webb *(photo)* à peine 280 millions d'années après le Big Bang, ce qui en fait la plus jeune galaxie connue dans l'Univers. Et elle a déjà tout d'une grande. L'analyse de sa lumière révèle une brillance inattendue, ainsi qu'une richesse en atomes tels que l'oxygène, l'azote ou le carbone, comme si plusieurs générations d'étoiles avaient déjà eu le temps de naître et de mourir, ensemençant l'Univers de ces nouveaux éléments. Cette découverte confirme la précocité d'un univers qui s'est peuplé de galaxies bien plus rapidement qu'on ne l'imaginait. **F. N.**

MAI

PREMIÈRE THÉRAPIE GÉNIQUE SUR MESURE

Les joues rondes de KJ Muldoon sont devenues en 2025 un symbole des progrès de la thérapie génique. Atteint d'une maladie génétique rare et mortelle empêchant son foie d'évacuer l'ammoniac, l'enfant né en août 2024 est devenu le premier patient au monde à bénéficier d'une thérapie génique sur mesure fondée sur la technique Crispr-Cas9. La correction du gène défectueux est passée par l'administration de nanoparticules dans le foie du bébé, traité à l'hôpital pour enfants de Philadelphie (États-Unis). **H. J.**

RETOUR SUR...

Les 10 découvertes de 2025

JUIN

LE VISAGE RÉVÉLÉ DE DENISOVA

Découvert en 2021 par une équipe chinoise près d'Harbin, dans le nord-est de la Chine, un crâne fossile de 146 000 ans avait été décrit comme celui d'une nouvelle espèce humaine éteinte : *Homo longi*, surnommé « l'homme dragon ». Mais le matériel génétique et les protéines récupérés dans ses plaques dentaires ont révélé qu'il s'agissait en réalité d'un dénisovien, une lignée éteinte d'humains archaïques étroitement apparentés aux néandertaliens. Cette espèce d'*Homo* n'était alors connue qu'à partir d'ADN issu de quelques fragments osseux retrouvés dans la grotte de Denisova, en Sibérie. Les analyses menées par l'Académie chinoise des sciences ont ainsi offert des traits quasi complets à l'homme de Denisova. **H. J.**

JUIL.

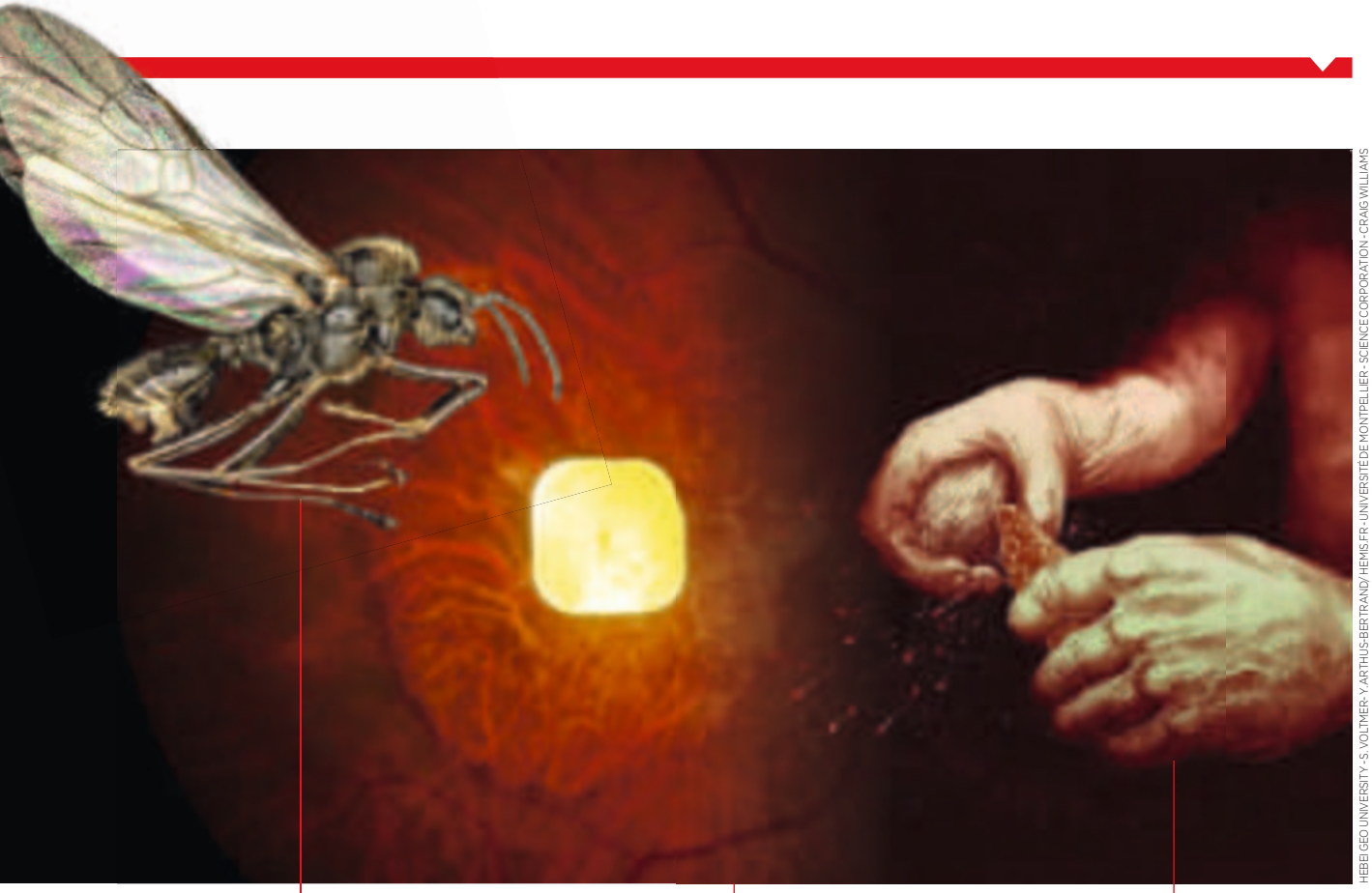
LA COMÈTE DE TOUS LES RECORDS

Repérée en juillet par le réseau de télescopes Atlas, la comète 3I/Atlas est le troisième objet interstellaire identifié à ce jour, après 1I/'Oumuamua en 2017 et 2I/Borisov en 2019. Ce corps céleste formé auprès d'une autre étoile que la nôtre se distingue fortement de ses prédécesseurs. Sa vitesse est faramineuse : 246 000 km/h, faisant de ce corps glacé la comète la plus rapide et la plus énergétique jamais détectée. Elle mesurerait aussi jusqu'à 5 km de longueur, bien plus qu'Oumuamua (environ 100 m) et Borisov (1 km). 3I/Atlas serait en outre très âgée : au moins 7 milliards d'années, trois de plus que le Système solaire lui-même, ce qui ferait de ce visiteur interstellaire la plus vieille comète connue pour le moment. **F. D.**

JUIL.

MISE AU JOUR DE LA TOMBE DU ROI CARACOL

Après 70 ans de fouilles, la cité maya de Caracol, qui s'étendait à son apogée sur 90 km² dans l'actuel Belize, a livré sa première tombe royale. Le couple d'archéologues américains Arlen et Diane Chase de l'université de Houston (États-Unis) y a découvert la dernière demeure du roi Te K'ab Chaak, mort vers l'an 350, et qui fut, il y a près de 1700 ans, le premier souverain de la cité. Ses restes reposaient dans un complexe architectural surnommé Caana (« place céleste » en maya), une imposante pyramide à degrés, haute de 43,5 mètres, comprenant quatre palais et trois temples. **S. de L.**



HEBEI GEO UNIVERSITY - S. VOLTMER - Y. ARTHUS-BERTRAND/ HEMIS.FR - UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER - SCIENCE CORPORATION - CRAIG WILLIAMS

SEPT.

LA FOURMI QUI TRANSGRESSE LES LOIS DE LA BIOLOGIE

« Nous nous doutions que quelque chose était très étrange avec cette espèce, mais nous étions loin d'imaginer à quel point », raconte Jonathan Romiguier, chercheur à l'université de Montpellier. Et pour cause ! À l'issue d'une étude de terrain, d'analyses génomiques et d'expériences en laboratoire, l'équipe française établit que les reines fourmis de l'espèce *Messor ibericus* sont capables de donner naissance à des fourmis d'une autre espèce que la leur : des clones mâles de l'espèce *Messor structor*. Deux lignées qui ont pourtant divergé il y a plus de 5 millions d'années. Sauf que la reine *Messor ibericus* a besoin des mâles *Messor structor* pour féconder les œufs qui donneront les ouvrières. Celles-ci seront en revanche toutes des hybrides. Une bizarrerie évolutive inédite ! **A.-S. T.**

OCT.

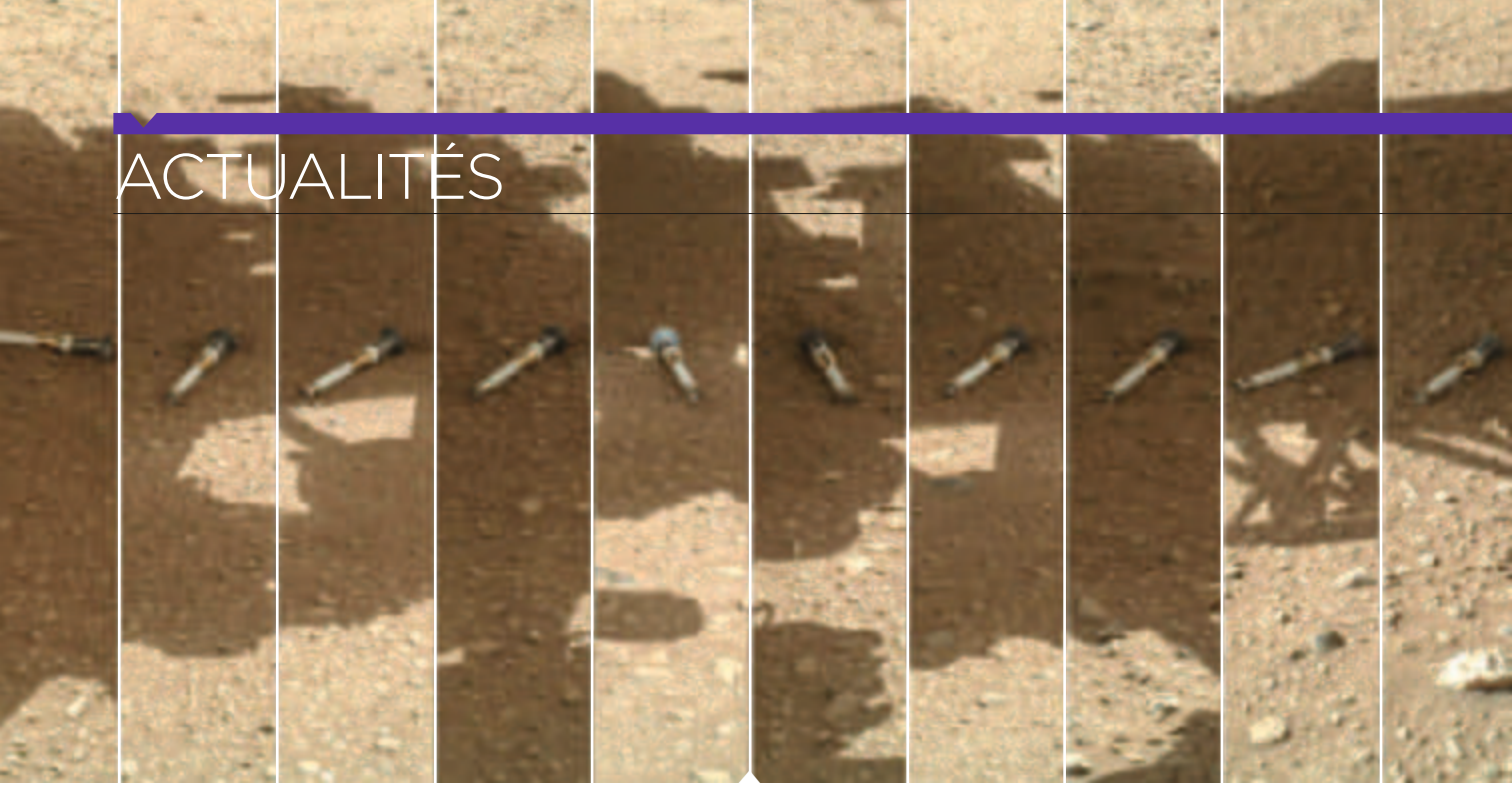
UN IMPLANT RÉTINIEN REND LA VUE

Une trentaine de patients, tous atteints de la forme sévère de dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA), ont pu retrouver une vision partielle grâce à un micro-implant inséré sous leur rétine venant se substituer aux cellules photoréceptrices mortes. Le dispositif comprend une paire de lunettes filmant l'environnement dont les images sont traitées par des algorithmes avant d'être projetées par laser sur l'implant rétinien. *« Des résultats exceptionnels »* pour Serge Picaud, directeur de recherche et aujourd'hui responsable de l'Institut de la vision. **S. R.-M.**

DÉC.

ET LE FEU JAILLIT IL Y A 400 000 ANS

En décembre 2025, dans la revue *Nature*, une étude apportait la preuve du plus ancien cas connu de fabrication de feu par l'humain, il y a environ 400 000 ans.
Le bond temporel est immense : les cas précédents de traces de fabrication de feu remontant seulement à… 50 000 ans !
À Barnham, dans un champ du Suffolk, au Royaume-Uni, les chercheurs ont mis au jour des preuves de l'origine anthropique du foyer : une parcelle d'argile chauffée, des haches en silex brisées par la chaleur et deux petits morceaux de pyrite de fer qui permettent de faire jaillir des étincelles. Une espèce minérale rare dans cette région. **M. B.**



Ces tubes en titane, d'environ 15 cm de longueur, contiennent des échantillons de roches prélevés à la surface de Mars par le robot Perseverance.

NASA/JPL-CALTECH/MSSS

Le retour d'échantillons martiens annulé

Sous la pression de la Maison-Blanche et du Congrès américain, la Nasa va renoncer à la mission de retour des échantillons collectés sur Mars par le rover Perseverance.

Le Congrès a tenu tête, pour l'essentiel, à Donald Trump. Alors que son administration entendait réduire de 24 % le budget de la Nasa et supprimer la moitié des crédits alloués à ses missions scientifiques, les comités des deux chambres parlementaires se sont accordés pour maintenir ce budget à 24,4 milliards de dollars (près de 21 milliards d'euros) pour l'année fiscale 2026. Ils ont néanmoins cédé à une injonction de la Maison-Blanche : *« L'accord ne soutient pas le programme de retour d'échantillons martiens »*, tranche un rapport daté du 5 janvier. Tout indique donc que le programme visant à rapporter sur Terre des dizaines d'échantillons collectés sur Mars par le rover Perseverance sera abandonné. *« C'est une décision très dure pour les planétologues et exobiologistes qui plaçaient d'immenses espoirs dans ces fragments rocheux,* observe Francis Rocard, responsable des programmes d'exploration du Système solaire au Centre national d'études spatiales. *Considérés comme une priorité scientifique très forte depuis une trentaine d'années, ils constituent probablement la seule façon de savoir si Mars a un jour abrité la vie. »*

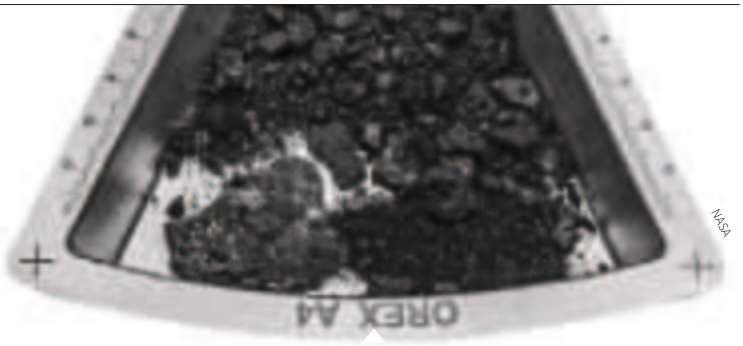
L'opération coûterait 11 milliards de dollars

Déposé sur Mars en 2021 dans le cratère Jezero, qui abritait un bassin lacustre il y a 3,5 milliards d'années, Perseverance avait presque terminé sa mission. Le robot à six roues a collecté à ce jour une trentaine d'échantillons sur un total de 43 en parcourant environ 40 km. Certains extrêmement prometteurs, comme une roche sédimentaire riche en fer et carbone organique, dont les minéraux ressemblent à ceux produits sur Terre par une variété de microbes *(lire* S. et A. *n° 944)*. Seules des analyses réalisées sur notre planète permettraient de trancher. Mais les technologies pour récupérer ces échantillons, les propulser en orbite martienne avant de les rapatrier sont très difficiles à mettre en œuvre.

En 2024, une commission évaluait ainsi à 11 milliards de dollars (9,4 milliards d'euros) le coût global de l'opération — soit 5 milliards de plus qu'escompté. Et pas avant 2040, dix ans après la date initialement prévue. *« Les coûts et délais étaient devenus exorbitants »*, reconnaît Francis Rocard. Sans compter que le Congrès voulait sécuriser d'autres objectifs de la Nasa, tels le programme lunaire Artemis *(lire p. 28)*, des missions vers Vénus et Uranus ou le quadricoptère Dragonfly qui doit s'envoler en 2028 vers Titan. *« S'ils sont correctement déposés sur le sol martien, les échantillons de Perseverance ne sont certes pas périssables,* note l'astrophysicien. *Je ne perds donc pas espoir que dans le futur, après la présidence de Trump, les Américains essaieront à nouveau de récupérer ces inestimables trésors. »* ■ **F. D.**

Du ribose identifié dans Bennu

Les échantillons de l'astéroïde recèlent tous les éléments de base du vivant.



NASA

Les roches et poussières rapportées en 2023 pourraient livrer de précieuses informations sur l'origine de la vie sur Terre.

Tous les ingrédients nécessaires à la fabrication de l'ARN, molécule essentielle au fonctionnement des cellules, sont désormais identifiés dans les échantillons de l'astéroïde Bennu, rapportés sur Terre en 2023. Il avait déjà été démontré que l'objet rocheux contenait une variété d'éléments liés au développement de la vie : eau, sels, acides aminés, ainsi que les cinq bases azotées (adénine, thymine, cytosine, guanine, uracile) composant l'ADN et l'ARN. Mais il manquait les sucres qui constituent le squelette de ces macromolécules — le désoxyribose pour l'ADN, le ribose pour l'ARN. Or ce dernier vient d'être décelé par des chercheurs japonais ! Cette découverte suggère que des astéroïdes auraient pu apporter sur Terre les éléments propices à l'apparition de la vie. Elle renforce aussi l'hypothèse que l'ARN se serait formé avant l'ADN, puisque le désoxyribose n'a pas été détecté dans les échantillons. **F. D.**

EN DEUX MOTS

MATÉRIAU Des chercheurs de l'université Cornell (États-Unis) ont réussi à créer un tissu en laine mérinos ultranoir, grâce à des nanoparticules capables d'absorber 99,87 % de la lumière. **POLLUTION SPATIALE** De 15 000 aujourd'hui, le nombre de satellites en orbite basse pourrait atteindre les 560 000 à l'horizon 2040, alerte une étude. **ROBOTIQUE** Des exosquelettes de langoustine actionnés par des tendons en élastomère ont été utilisés pour fabriquer des pinces biohybrides par des ingénieurs suisses.

L'œil de Lascar

ESPACE L'astronaute française Sophie Adenot s'est déclarée « *sereine* » et « *impatiente* » à l'approche de son envol vers la Station spatiale internationale, prévu le 15 février. Deuxième femme française dans l'espace après Claudie Haigneré, elle participera à une mission de huit mois qui lui permettra de mener des expériences scientifiques, dont l'une sur l'échographie assistée par réalité augmentée. **O. L.**

22,1 MILLIARDS D'EUROS
Le budget record de l'Agence spatiale européenne

ESPACE C'est du jamais-vu : l'Agence spatiale européenne (ESA) a obtenu 22,1 milliards d'euros des États membres pour financer ses programmes civils et stratégiques — éventuellement militaires — jusqu'en 2028. Soit une hausse de 5 milliards par rapport au précédent budget établi en 2022. **H. J.**

Une trompe de moustique pour imprimer en 3D

INGÉNIERIE Le proboscis (trompe) d'un moustique a été fixé à l'extrémité d'un réservoir à piston pour servir de buse d'impression. Le mécanisme permet d'obtenir des filaments de matériau extrêmement fins, de 20 à 25 micromètres, à faible coût. D'une rigidité équivalente à celle du plastique, la trompe de l'insecte produit aussi des impressions variant assez peu du modèle numérique. **A. D.**

SOURCE : JUSTIN PUMA, UNIVERSITÉ MCGILL, CANADA.

J. PUMA ET AL.

Le proboscis de l'insecte femelle a été transformé en buse d'impression 3D.

Première détection de décharges électriques sur Mars

PLANÉTOLOGIE De petites décharges d'électricité statique ont été observées pour la première fois sur Mars, au cœur des tourbillons de poussière. Elles ont été détectées grâce au microphone du rover Perseverance, qui a enregistré à la fois l'impulsion électrique et le son de l'étincelle. Elles pourraient jouer un rôle clé dans la chimie de l'atmosphère et la dynamique des tempêtes de poussière. **F. N.**

SOURCE : BAPTISTE CHIDE, UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, FRANCE.

ALAMY/PHOTO12

Les tourbillons de poussière à la surface martienne déclenchent des étincelles.

NASA, ESA, CSA, RALF CRAWFORD (STSCI)

Soumise au rayonnement puissant du cadavre de son étoile, la géante gazeuse PSR J2322–2650b a la forme d'un ballon de rugby (vue d'artiste).

Une exoplanète façonnée par un pulsar

Elle subit l'attraction gravitationnelle de cette étoile à neutrons qui la déforme.

La diversité des exoplanètes ne cesse de surprendre. PSR J2322–2650b est une géante gazeuse d'une masse voisine de celle de Jupiter. Mais la comparaison s'arrête là. Elle est chauffée à 1600–1 700 °C et sa forme évoque vaguement celle d'un ballon de rugby. Enfin, le télescope spatial James-Webb a identifié des signatures de carbone « pur » (C_2, C_3) dans son atmosphère, suggérant des nuages de suie qui se condensent peut-être en diamants…

Ces caractéristiques extrêmes s'expliquent notamment par l'environnement de la planète : elle orbite à seulement 1,6 million de kilomètres d'un pulsar, vestige d'étoile massive devenu étoile à neutrons. Elle est donc aux premières loges pour subir l'attraction gravitationnelle de l'astre qui la déforme, et le bombardement incessant des puissants jets d'énergie qui la réchauffent. En revanche, l'origine de son atmosphère si « carbonée » demeure un mystère. **F. N.**

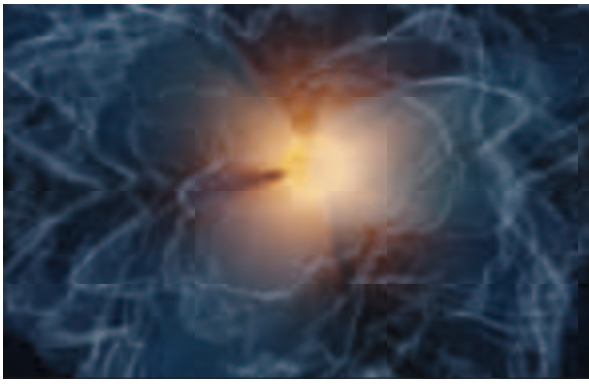
La Chine à la pointe des technologies

RECHERCHE L'empire du Milieu domine les activités de recherche dans près de 90 % des technologies qui *« renforcent de manière significative ou pourraient poser des risques aux intérêts d'un pays »,* notamment dans les domaines de l'énergie nucléaire, la biologie de synthèse ou les nanosatellites, affirme l'Institut australien de stratégie politique, qui a analysé 9 millions de publications scientifiques. Les États-Unis ne sont en tête que dans huit secteurs, tels le calcul quantique ou la géo-ingénierie. Il y a 25 ans, ce rapport était inversé. **F. D.**

Hubble surprend des collisions planétaires

ASTROPHYSIQUE Grâce aux données collectées par le télescope Hubble sur plus de 20 ans, les chercheurs ont mis en évidence deux nuages de débris exceptionnellement lumineux, en 2008 et 2023, autour de Fomalhaut A, un jeune système planétaire situé à 25 années-lumière de nous. Ils correspondent à des collisions entre planétésimaux, un événement fréquent dans la formation des planètes. Mais ce rythme — deux en 15 ans — est bien plus élevé que prévu par les modèles. **F. N.**

SOURCE : PAUL KALAS, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE À BERKELEY, ÉTATS-UNIS.



CFA/MELISSA WEISS

Cartographie de la frontière extérieure du Soleil

ASTRONOMIE Une collaboration américano-britannique est parvenue à cartographier la surface d'Alfvén, sorte de frontière où le vent solaire — flux de particules chargées — devient plus rapide que les ondes magnétiques émises par la surface du Soleil *(vue d'artiste ci-contre)*. Les données recueillies par de multiples sondes, dont Parker Solar Probe, révèlent une région variant avec le cycle d'activité de notre étoile, s'étendant de 7,2 à 12 millions de kilomètres. **J. B.**

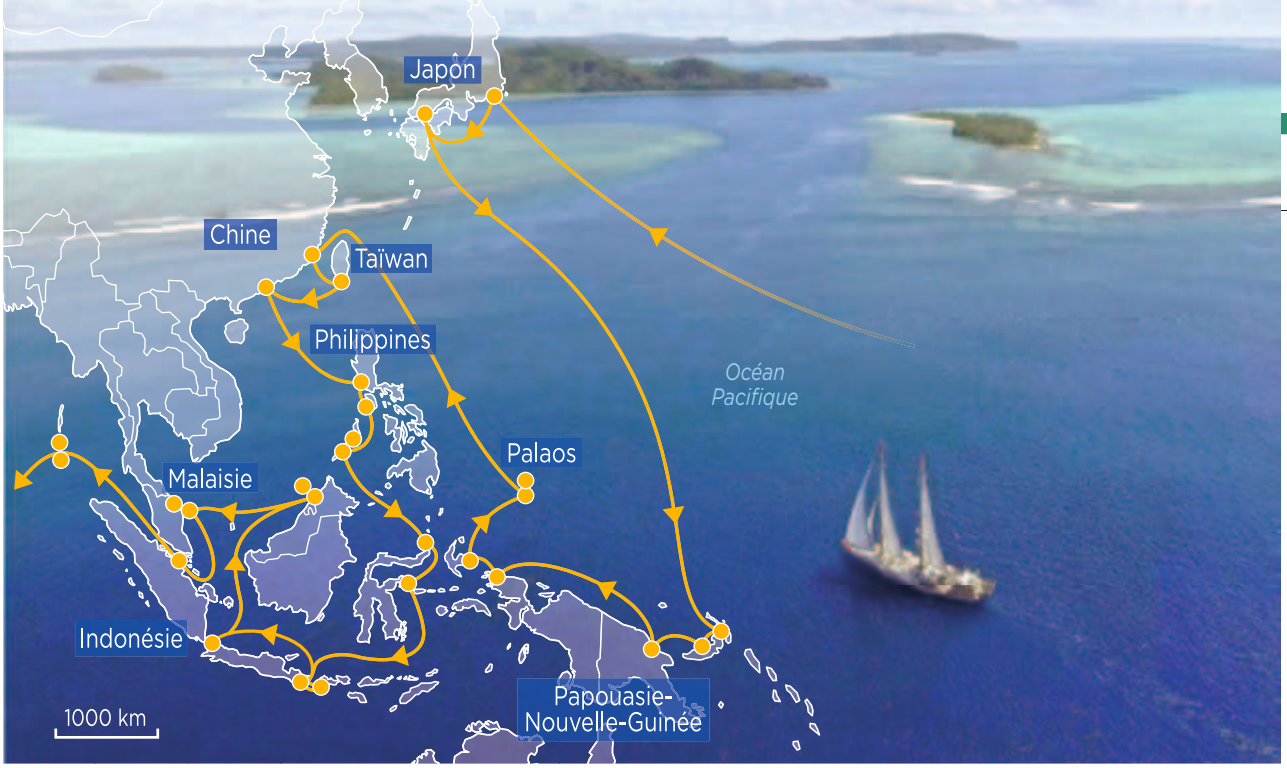
SOURCE : SAMUEL BADMAN, UNIVERSITÉ HARVARD, ÉTATS-UNIS.

“Les pauvres sont des gens comme *nous*, sauf qu’ils n’ont pas *d’argent*.”

LES RESTAURANTS DU CŒUR
LES RELAIS DU CŒUR

JE FAIS UN DON

©Gaston Bergeret



PETE WEST – BIOQUEST STUDIOS

Tara à l'assaut des super-coraux

Cette expédition dans le Pacifique tentera de comprendre pourquoi certains récifs coralliens résistent mieux au réchauffement climatique.

La goélette scientifique *Tara* a quitté Lorient le 14 décembre dernier pour une mission de 18 mois consacrée à l'étude des coraux. *« Les récifs coralliens sont les oasis de l'océan,* souligne Paola Furla, chercheuse à l'université Côte-d'Azur. *S'ils n'occupent que 2 % de la surface océanique, ils abritent 25 % de sa biodiversité et font vivre plus de 500 millions de personnes dans le monde.* »

Aujourd'hui, ces récifs sont menacés par les canicules marines, l'acidification des océans, les techniques destructrices de pêche, ou encore le déversement de polluants agricoles. Mais certains coraux semblent mieux résister à ces agressions, notamment dans le Triangle de corail, une région du Pacifique Ouest qui abrite la plus riche biodiversité marine de la planète. Ses 5,7 millions de km² accueillent un tiers des récifs coralliens du monde, 76 % des espèces de coraux connues et plus de 2200 espèces de poissons de récifs. C'est aussi la seule grande région récifale où la couverture corallienne est restée relativement stable.

« Nous voulons comprendre le contexte résistant et résilient de cette zone, explique Serge Planes, chercheur à l'École pratique des hautes études. *Il y a là une diversité exceptionnelle du nombre de coraux, avec peut-être des espèces plus résistantes, ce qui pourrait permettre à la couverture corallienne de se maintenir.* »

À moins que le système ait développé des mécanismes d'acclimatation au changement climatique ou des partenariats spécifiques entre virus, algues et protozoaires ? L'échantillonnage réalisé dans dix sites ciblera quatre espèces (acropores, millépores, porites et *Pocillopora*) et leur environnement. ■ **S. R.**

16 000 Le nombre de nouvelles espèces identifiées par an

BIODIVERSITÉ Loin d'un plafonnement, des biologistes montrent que le nombre d'espèces découvertes connaît une progression sans précédent. Grâce aux outils génétiques, plus de 16 000 nouvelles espèces sont recensées chaque année, parmi lesquelles 10 000 animaux — principalement des insectes —, 2500 plantes et 2000 champignons. Supérieur au rythme d'extinction des espèces, ce résultat révèle que la biodiversité terrestre est aujourd'hui mieux connue que jamais. **T. de B.**

SOURCE : JOHN J. WIENS, UNIVERSITÉ D'ARIZONA, ÉTATS-UNIS.

La chaleur rend les lézards invasifs plus agressifs

ÉTHOLOGIE À La Nouvelle-Orléans (États-Unis), les anolis bruns invasifs (*photo*) deviennent plus agressifs envers les anolis verts indigènes à mesure que les températures augmentent. C'est ce que montrent des essais en enclos, qui suggèrent que le réchauffement climatique en cours pourrait faire basculer l'équilibre compétitif entre les deux espèces. **R. F.**

SOURCE : A. GUNDERSUN, UNIVERSITÉ DE TULANE, ÉTATS-UNIS.

M. GUNTHER / BIOSPHOTO

CHIEN LEE/MINDEN PICTURES/BIOSPHOTO

« Balanophora » n'apparaît à la surface du sol que lors de sa floraison.

Comment ces plantes survivent sans soleil

BOTANIQUE C'est un élégant tour de force évolutif qui permet aux plantes du genre *Balanophora*, parasite des racines d'arbre, de vivre sans photosynthèse ni chlorophylle. Leur génome conserve bien la trace de plastes, ces organites cellulaires qui, chez les autres végétaux, servent de panneaux solaires ou à la biosynthèse des molécules, mais réduits à leur plus simple expression. **R. F.**

SOURCE : KENJI SUETSUGU, UNIVERSITÉ DE KOBE, JAPON.

La mortalité des arbres s'accélère en Australie

DENDROLOGIE Une étude menée à partir des données d'inventaire forestier de 2700 parcelles en Australie sur 30 ans montre que le taux de mortalité des arbres y a augmenté en moyenne de 3,2 % par an, passant d'environ 15 pour 1000 en 1996 à près du double en 2017. Une accélération vraisemblablement due à l'augmentation des températures. **H. J.**

SOURCE : RUILING LU, UNIVERSITÉ OCCIDENTALE DE SYDNEY, AUSTRALIE.

IL A DIT

« Ce coléoptère est le premier animal terrestre connu à réduire sa température corporelle en faisant de l'exercice »

Duncan Mitchell, professeur à l'université du Witwatersrand (Afrique du Sud), coauteur d'une étude montrant que l'*Onymacris plana*, endémique du brûlant désert du Namib (Namibie), se rafraîchit en courant les dunes à grande vitesse — environ 4 km/heure.

Prélever l'haleine de baleine à l'aide de drones

BIOLOGIE Des chercheurs sont parvenus à prélever des échantillons d'air expiré par des cétacés, grâce à un dispositif constitué d'un drone, quatre boîtes de Petri stériles et deux flotteurs. Testé sur des baleines à bosse et des cachalots au large de la Norvège, ce drone de surveillance épidémiologique a révélé la présence d'un virus potentiellement mortel chez les cétacés. **T. de B.**

SOURCE : HELENA COSTA, UNIVERSITÉ DU NORD, NORVÈGE.

NORD UNIVERSITY

Le drone équipé de boîtes de Petri a capté l'air expiré par le cétacé.

Une IA pour le suivi de la faune africaine

L'algorithme DeepForestVision identifie avec 87,7 % de précision les animaux pris en photo ou vidéo dans les forêts africaines.

Une équipe internationale de scientifiques conduite par Sabrina Krief, professeure au Muséum national d'histoire naturelle (MNHN), à Paris, a mis au point une intelligence artificielle capable d'identifier avec une précision inédite la faune sur les images captées par des pièges photographiques. Dans la densité des forêts tropicales africaines, ces pièges sont en effet en première ligne pour surveiller discrètement les animaux. Au point qu'ils fournissent désormais une masse de données difficiles à traiter. Jusqu'à 1000 vidéos par semaine dans le parc national de Kibale en Ouganda, soit 50 heures de travail pour une personne. L'algorithme DeepForestVision a ainsi été entraîné sur plus de 2,7 millions de photos et quelque 220 000 vidéos issues de pièges positionnés sur plus de 63 sites de recherche à travers 11 pays africains. Il est capable d'identifier avec 87,7 % de précision 33 taxons de vertébrés non humains, dont 31 taxons de mammifères *« des plus communs aux plus menacés »*, assurent les chercheurs. **A.-S. T.**

SEBITOLI CHIMP PROJECT, S. KRIEF

Des chimpanzés identifiés par l'IA dans le parc de Kibale, en Ouganda.

« Pelophylax nigromaculatus » avalant un frelon.

SHINJI SUGIURA, ECOSPHERE 2025

Des grenouilles insensibles au venin des frelons géants

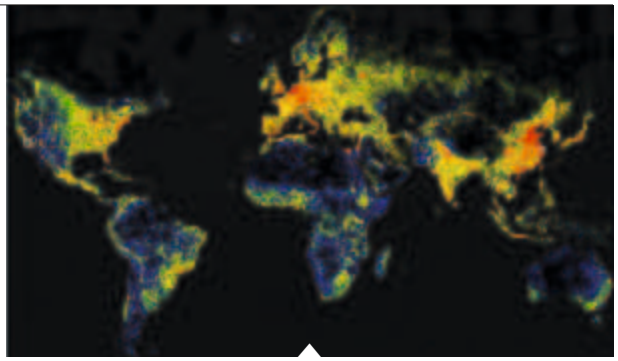
HERPÉTOLOGIE Un chercheur japonais a organisé des combats entre la grenouille *Pelophylax nigromaculatus* et des frelons géants asiatiques qu'elle consomme habituellement à l'état sauvage. Ce qui a permis de vérifier que, loin d'éviter le dard de l'insecte lors des affrontements, l'amphibien commun était tout à fait insensible à la piqûre et au puissant venin de ce frelon de 4 cm — responsable de 30 à 50 décès humains par an en Asie. **A.-S. T.**

SOURCE : SHINJI SUGIURA, UNIVERSITÉ DE KOBE, JAPON.

Un filtre à microplastique inspiré de gueules de poisson

BIO-INGÉNIERIE Les prochaines machines à laver pourraient être dotées de filtres autonettoyants inspirés du système branchial de l'anchois ou de la sardine. Ces derniers se nourrissent en nageant gueule ouverte pour filtrer l'eau et capturer le plancton grâce à des sortes de peignes munis de petites dents. Le système, adapté pour piéger les microplastiques, a montré une efficacité de 99 %. **R. F.**

SOURCE : LEANDRA HAMANN, UNIVERSITÉ DE BONN, ALLEMAGNE.



ZHU ET AL., EARTH SYST. SCI. DATA

L'atlas recense 2,75 milliards de bâtiments dans le monde, montrant les zones les moins construites (en bleu) jusqu'aux plus denses (en rouge).

Une carte de tous les bâtiments de la planète

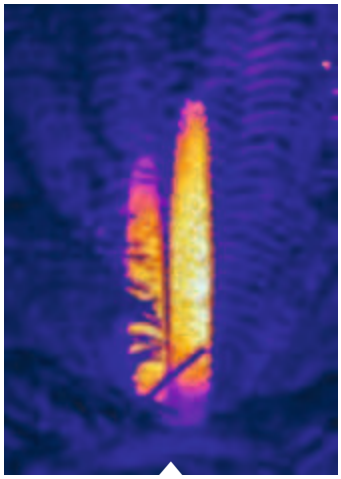
URBANISME Des chercheurs ont créé l'atlas 3D le plus complet à ce jour de l'ensemble des bâtiments du monde. Le GlobalBuildingAtlas comprend pas moins de 2,75 milliards de modèles de construction, couvrant toutes les structures capturées par imagerie satellite depuis 2019. Jusqu'ici, le plus grand ensemble de données n'en comptait que 1,7 milliard. Et cette fois, les modèles 3D de cette cartographie sont d'une résolution de 3 x 3 mètres. **H. J.**

SOURCE : XIAO XIANG ZHU, UNIVERSITÉ TECHNIQUE DE MUNICH, ALLEMAGNE.

La chaleur, premier langage entre plantes et pollinisateurs

Certains végétaux émettent de la chaleur infrarouge capable d'attirer leurs insectes pollinisateurs.

Dès le permien, il y a 275 millions d'années, certaines plantes communiquaient déjà avec les insectes, mais sans odeurs ni couleurs : elles chauffaient. Une découverte rapportée dans *Science* par une équipe de l'université Harvard (États-Unis) qui montre que les cycadales, les plus anciennes plantes à graines pollinisées par des animaux, émettent chaque jour un bref pic de chaleur infrarouge capable d'attirer leurs insectes pollinisateurs à distance. Ce pic se produit au niveau des cônes pollinisateurs qui abritent les gamètes mâles et femelles et il peut élever leur température de plusieurs dizaines de degrés au-dessus de la température ambiante. Il est produit par des composants cellulaires (les mitochondries) particulièrement actifs et synchronisés par une horloge circadienne. Ce signal, toujours présent chez les espèces actuelles, est perçu par les coléoptères qui convergent systématiquement vers la zone la plus chaude du cône, puis quittent les cônes mâles lorsque la température chute pour se diriger vers les cônes femelles. **J. I.**



WENDY VALENCIA-MONTOYA

Les cônes mâles des cycadales émettent chaque jour un pic de chaleur qui libère le pollen et attirent ainsi les coléoptères.

63 °C

La température record pour une amibe

BIOLOGIE Une amibe vivant dans des sources d'eau chaude à 63 °C a été découverte en Californie (États-Unis) dans la chaîne volcanique des Cascades. C'est le record de température de vie pour une cellule eucaryote (100 °C pour les bactéries, 122 °C pour les archées). L'étude de son génome a montré une adaptation aux hautes températures des protéines de cette cellule se nourrissant de bactéries. **P. K.**

SOURCE : ANGELA OLIVERIO, UNIVERSITÉ DE SYRACUSE, ÉTATS-UNIS.

LES CROISIÈRES DU SAVOIR SCIENCES ET AVENIR
www.croisiere-du-savoir.fr

DES VOLCANS ET DES HOMMES
Une odyssée méditerranéenne

du 23 octobre au 1er novembre 2026

10 JOURS - 9 NUITS

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef de Sciences et Avenir

En octobre 2026, *Sciences et Avenir* vous propose d'embarquer pour une nouvelle « Croisière du savoir » en compagnie de deux éminents scientifiques. Cette année, nous vous invitons à explorer un bassin méditerranéen façonné à la fois par les forces du feu et par les grandes civilisations qui l'ont peuplé. De Nice à Istanbul en passant par l'Italie, la Sicile et la Grèce, cette odyssée offrira une lecture inédite du monde méditerranéen, mêlant sciences, récits et émotions.

Tout au long du voyage, nous serons accompagnés par Philippe Charlier et Jacques-Marie Bardintzeff. Volcanologue et professeur des universités à l'Université Paris-Saclay, Jacques-Marie Bardintzeff nous guidera à la rencontre des géants de feu méditerranéens — Vésuve, Stromboli, Etna, que nous approcherons. Quant à Philippe Charlier, médecin légiste, anthropologue et historien, connu pour ses enquêtes sur Richard Cœur de Lion ou Henri IV, il éclairera la manière dont les sociétés méditerranéennes ont appréhendé la vie, la mort et le corps humain, avec une attention particulière portée aux traditions à Olympie.

Après avoir quitté Nice, nous rejoindrons Piombino puis Naples, dominée par l'imposante silhouette du Vésuve. Nous poursuivrons vers les îles Éoliennes, Lipari et Stromboli, avant de traverser le détroit de Messine pour regagner Catane, au pied de l'Etna. Notre traversée se prolongera ensuite vers la Grèce : Katakolon, porte d'accès au site d'Olympie ; puis Gythion, proche de la byzantine Mystra. Une escale à Syros précédera enfin notre arrivée à Istanbul, carrefour de l'Orient et de l'Occident.

Vos accompagnateurs Sciences et Avenir*

Philippe Charlier

Médecin légiste, anthropologue et historien, ancien directeur du département de la Recherche et de l'Enseignement au musée du Quai-Branly-Jacques-Chirac, maître de conférences à l'université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines.

Jacques-Marie Bardintzeff

Volcanologue et professeur des universités à l'université Paris-Saclay, auteur de nombreux ouvrages dont « Volcanologue » (L'Harmattan, 2e édition, 2025).

* non contractuel, sous réserve de disponibilité.

Notre croisière se déroulera à bord du « MS Hamburg », un navire à taille humaine n'accueillant pas plus de 380 passagers avec trois espaces de conférences. Il répond aux dernières exigences environnementales sur les carburants, échappement et traitement des déchets. Il est exploité avec du diesel marin à faible teneur en soufre au lieu de l'huile lourde, conformément aux normes ISO actuelles et aux spécifications de MARPOL / OMI. Toutes les eaux usées sont traitées et purifiées avant d'être renvoyées hors du navire en qualité d'eau potable.

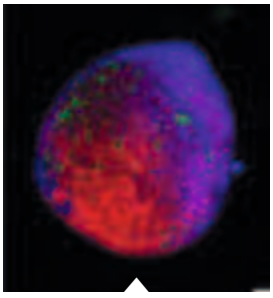
RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS

PLEIN CAP « Croisières du Savoir »
CROISIÈRES PLEIN CAP : 251 ROUTE DE LA COLLE - 06270 VILLENEUVE-LOUBET
info@plein-cap.com - Tél. 04 93 20 21 20

Des organoïdes de cœur battants

CARDIOLOGIE Pour la première fois, des organoïdes cardiaques, minuscules modèles fonctionnels du cœur humain, ont pu reproduire l'anomalie la plus fréquente du trouble du rythme cardiaque, la fibrillation auriculaire. Ces mini-organes battants doivent permettre de tester de nouvelles molécules contre une maladie touchant 60 millions de personnes dans le monde. **S. R.-M.**

SOURCE : COLIN O'HERN, UNIVERSITÉ D'ÉTAT DU MICHIGAN, ÉTATS-UNIS.



COLIN O'HERN ET AL.

Le mini-organe a reproduit des pulsations cardiaques.

IL A DIT

« Nos résultats suggèrent que l'exercice physique est une option pour aider à gérer les symptômes de la dépression »

Andrew Clegg, professeur à l'université du Lancashire (Royaume-Uni) et auteur d'une méta-analyse dans la revue de référence *Cochrane* montrant qu'une activité sportive peut parfois être aussi bénéfique qu'une psychothérapie.

CHASSENET / BSIP

L'absence d'effets graves sur la santé de la vaccination contre le Covid-19 a été démontrée. ◄

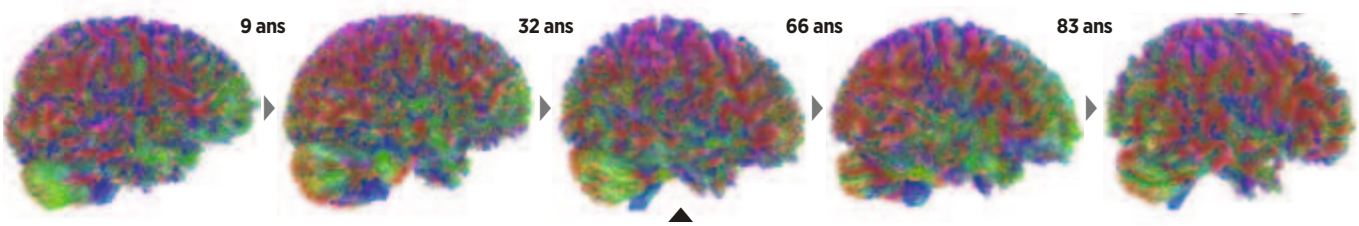
Les vaccins anti-Covid bénéfiques à long terme

Aucune hausse de la mortalité n'a été causée par les vaccins à ARN messager, selon une étude sur 30 millions de Français entre 2021 et 2025.

Contrairement aux craintes répandues par les vaccino-sceptiques, les vaccins à ARN messager massivement utilisés contre le Covid-19 à partir de 2021 n'ont causé aucune hausse de la mortalité sur le long terme, bien au contraire. C'est ce que montre une étude conduite sur l'ensemble de la population française par une équipe d'Epi-Phare, groupe de recherche en épidémiologie commun à l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM) et à l'Assurance maladie. *« On connaissait bien le profil à court terme des vaccins Covid en matière de bénéfices et de risques ; en revanche, leur bénéfice à long terme n'avait jamais été étudié »*, explique le Pr Mahmoud Zureik, directeur d'Epi-Phare, qui a supervisé l'étude. Les chercheurs ont examiné les données de près de 30 millions de Français entre 2021 et 2025, soit l'ensemble de la tranche d'âge 18-59 ans. Près de 23 millions d'entre eux ont reçu un vaccin à partir de la mi-2021, date de lancement d'une campagne massive de vaccination contre la maladie à l'origine d'une pandémie majeure au début des années 2020. Les 6 millions restants n'ont pas été vaccinés, malgré les mesures contraignantes.

Les individus vaccinés, moins à risque de décès

Toutes causes de décès confondues (cancer, maladie cardio-vasculaire, accident, suicide, etc.), il s'avère que 0,4 % des personnes vaccinées sont mortes dans les quatre années ayant suivi l'administration du premier vaccin, contre 0,6 % des non-vaccinés. Et l'analyse statistique montre que les vaccinés ont bénéficié d'une baisse de 74 % du risque de mourir d'un Covid-19 sévère ; et de 25 % en incluant toutes les autres causes. Autrement dit, *« les individus vaccinés étaient moins à risque de décès que les individus non vaccinés, quelle que soit la cause de décès considérée »*, écrivent les auteurs dans la publication. *« On peut dire avec un grand degré de confiance qu'il n'y a pas d'augmentation du risque de mortalité après un vaccin Covid »*, conclut Mahmoud Zureik, et ce, même en comptant les effets indésirables recensés de la vaccination. ■ **C. G.**



Les faisceaux de connexions neuronales se modifient à quatre reprises au cours de la vie, selon les données d'IRM.

DR ALEXA MOUSLEY, UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

Comment le cerveau se reconnecte

Nos cerveaux évoluent avec l'âge, mais pas de façon stable et linéaire, démontrent de nouveaux travaux.

Nos réseaux neuronaux traversent quatre phases de « recâblage » au cours de notre vie, des transitions survenant autour de 9, 32, 66 et 83 ans. C'est ce qu'a mesuré pour la première fois une étude publiée dans *Nature Communications* par des neuroscientifiques de l'université de Cambridge (Royaume-Uni). À partir des données d'IRM cérébrales de plus de 3800 personnes, l'équipe a généré des cartes multicolores représentant les faisceaux de connexions entre les neurones constituant la substance blanche. Des points de bascule dans la connectivité cérébrale sont ainsi apparus. À 9 ans, passé une phase de croissance et de stabilisation des circonvolutions du cerveau, les réseaux présentent une phase d'augmentation de l'efficacité neuronale, atteignant son pic au début de la trentaine. Entre 32 et 66 ans, le cerveau connaît une longue phase de stabilisation de son architecture avec une compartimentation de ses zones. Les deux dernières phases marquent une perte de plasticité des réseaux et un déclin marqué de la connectivité à partir de 83 ans. **C. G.**

EN DEUX MOTS

MÉDECINE L'Organisation mondiale de la santé annonce vouloir promouvoir les médecines traditionnelles (acupuncture, ayurvéda…) en s'aidant de l'intelligence artificielle. **DIABÈTE** L'Union européenne a approuvé la mise sur le marché du Teizeild (Sanofi), premier traitement par perfusion permettant de freiner la réaction auto-immune à l'origine du diabète de type 1. **ONCOLOGIE** Une étude démontre que les anticancéreux personnalisés en fonction de l'ADN de chaque tumeur améliorent fortement le succès du traitement.

SPL / BSIP

Le mécanisme des voix « entendues » par les patients a été identifié.

L'origine des hallucinations auditives de la schizophrénie élucidée

PSYCHIATRIE Symptôme psychotique majeur de la schizophrénie, les hallucinations auditives verbales seraient bien le résultat d'une perception erronée des malades de leur propre discours intérieur. Cette hypothèse formulée il y a 50 ans a été confirmée par une étude en s'appuyant sur l'imagerie cérébrale pour observer l'activité neuronale de patients pendant qu'ils entendaient ces voix. **H. J.**

SOURCE : THOMAS WHITFORD, UNIVERSITÉ DE NOUVELLE-GALLES-DU-SUD, AUSTRALIE.

Un supermicroscope pour traquer la grippe

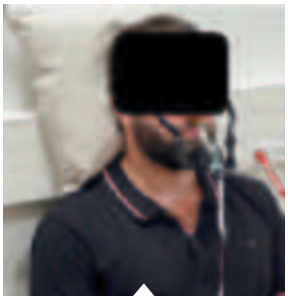
VIROLOGIE Révéler en temps réel l'infiltration du virus de la grippe dans nos cellules, c'est ce qu'a permis la combinaison de deux puissants outils d'imagerie, la microscopie à force atomique (AFM) et celle dite à fluorescence. La résolution inédite de cette supermicroscopie a permis d'observer la manière dont les cellules respiratoires se défendent avant d'être infectées. De quoi examiner à l'échelle cellulaire l'action des antiviraux prescrits. **S. R.-M.**

SOURCE : AIKO YOSHIDA, UNIVERSITÉ DE HOKKAIDŌ, JAPON.

Une prothèse olfactive contre l'anosmie

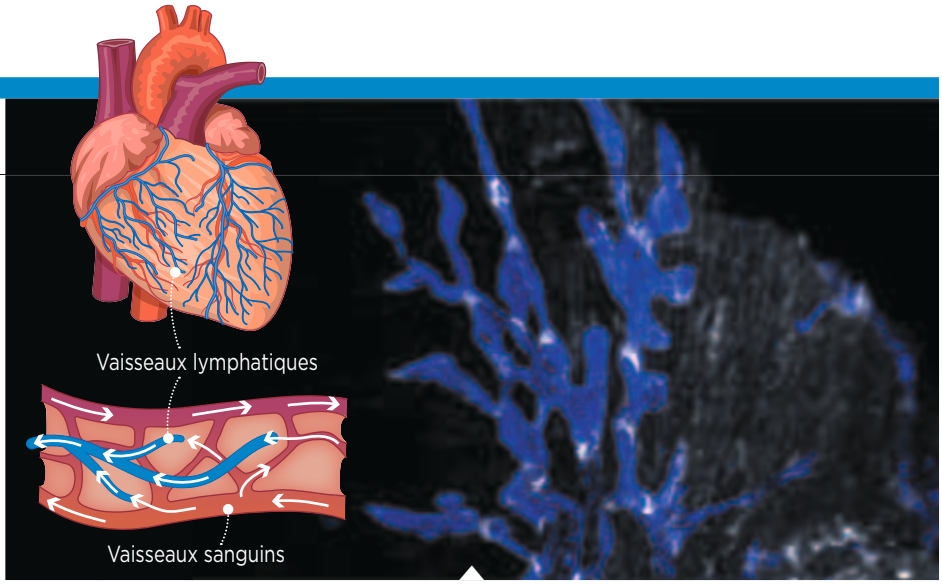
ORL En associant un nez artificiel détectant les molécules odorantes à un stimulateur électrique intranasal, des chercheurs français ont permis à des patients ayant perdu l'odorat de détecter — et parfois différencier — des odeurs. Le stimulateur active un système sensoriel distinct de l'odorat, dédié aux sensations de chaud, de froid, de picotement ou d'irritation. Chaque odeur captée par le nez artificiel déclenche ainsi un motif spécifique produisant une sensation perceptible. **H. J.**

SOURCE : HALINA STANLEY, CNRS, FRANCE



MOUSTAFA BENSAFI

Le dispositif associe un nez artificiel qui détecte les odeurs à un petit stimulateur électrique placé dans la cavité nasale.



BRUNO BOURGEOIS - INSERM

Les valves (en blanc, à droite) ont un rôle essentiel dans le réseau lymphatique cardiaque (vaisseaux en bleu).

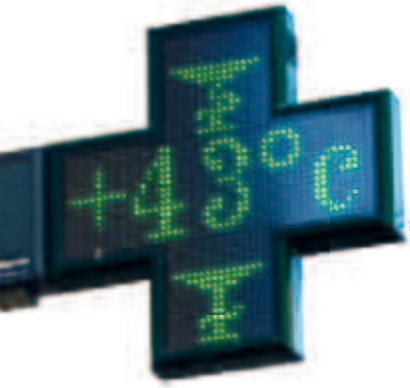
Cœur : des valves inconnues dans le système lymphatique

Les chercheurs comprennent mieux pourquoi le système lymphatique se dérègle en cas d'insuffisance cardiaque.

De nouvelles valves viennent d'être identifiées au cœur du système lymphatique cardiaque qui, en parallèle du réseau sanguin, évacue et draine les excès de liquides comme les débris cellulaires. C'est l'étonnante découverte faite par une équipe de l'Inserm et de l'université de Rouen-Normandie, qui a analysé chez l'animal comment le système lymphatique se dérègle dans l'insuffisance cardiaque. Ils ont, pour la première fois, identifié les mécanismes cellulaires et moléculaires responsables de ce dysfonctionnement et découvert qu'une diminution du nombre de ces valves était liée à l'altération du drainage. Ces résultats à confirmer chez l'humain ouvrent une nouvelle voie de recherche : trouver des stratégies pour régénérer les valves lymphatiques perdues, avec l'espoir de rétablir leur fonction essentielle de drainage du cœur. **S. R.-M.**

L'impact du climat sur la santé devient un enjeu sanitaire

SANTÉ PUBLIQUE « *La santé environnementale n'est plus une inquiétude lointaine et émerge comme une préoccupation quotidienne*. » C'est le constat fait par Yann Le Strat, directeur scientifique de Santé publique France à la présentation de l'enquête bisannuelle Baromètre Santé 2024. Celle-ci révèle que 78,8 % de la population française a été confrontée à au moins un événement climatique extrême dans les deux ans qui ont précédé, faisant du climat un enjeu de santé publique. **C. G.**

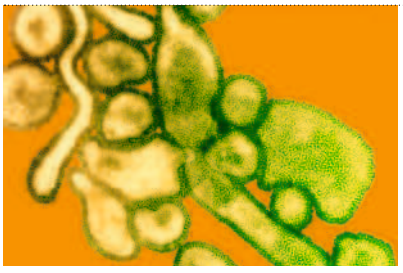


AFP

Un gène anti-leucémie porteur d'espoir

GÉNÉTIQUE Un variant génétique rare et précieux vient d'être identifié : il est capable de prévenir l'apparition des cancers du sang, les leucémies, et de ralentir leur progression lorsqu'ils surviennent. Nommé rs17834140-T, le variant présent chez 1 à 5 % de la population empêche la prolifération de cellules souches sanguines mutées. De fait, il pourrait constituer une nouvelle cible thérapeutique. **C. L.**

SOURCE : GAURAV AGARWAL, ÉCOLE DE MÉDECINE HARVARD, ÉTATS-UNIS.



SPL/ SUCRE SALÉ

◀ **Le virus H5N1** est adapté pour survivre à des températures plus élevées que d'autres virus de la grippe chez l'humain.

La grippe aviaire résiste à la fièvre

VIROLOGIE **À l'inverse des souches de grippe saisonnière qui ne supportent pas une fièvre de 40 °C, les grippes aviaires sont plus résistantes, montre une étude britannique. De fait, ces virus circulent d'abord chez les oiseaux, dont la température corporelle est naturellement entre 41 et 42 °C. Une grippe aviaire venant à circuler entre humains serait donc plus difficile à éliminer. Un peu comme l'ont été les souches à l'origine des pandémies meurtrières de 1918, 1957 et 1968.** **P. K.**

SOURCE : MATTHEW TURNBULL, UNIVERSITÉ DE GLASGOW, ROYAUME-UNI.

197

Le nombre d'enfants conçus à partir d'un sperme cancérogène

BIOLOGIE Une enquête de médias européens a révélé que du sperme provenant de la banque danoise European Sperm Bank, utilisé pour près de 200 procréations médicalement assistées entre 2006 et 2023, provenait d'un porteur sain d'une grave anomalie génétique : une mutation jamais décrite augmentant significativement le risque de cancer. **H. J.**

CHERBOURG, LÀ OÙ COMMENCENT LES HISTOIRES.
TITANIC
LE REDOUTABLE
LA CITÉ DE LA MER
LA CITÉ DE LA MER
CHERBOURG
citedelamer.com
leCotentin

ELLE A DIT

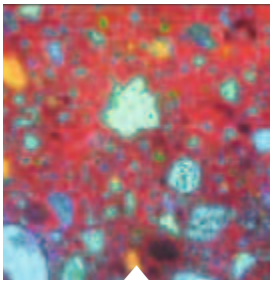
« Nous avons trouvé plus de 800 minuscules pierres dans la gorge de ce fossile d'oiseau vieux de 120 millions d'années »

Jingmai O'Connor, conservatrice au Field Museum de Chicago (États-Unis), à l'origine de cette découverte. Selon la paléontologue, l'animal les aurait ingérées volontairement avant de les régurgiter en un seul amas, précipitant sa mort.

Les secrets du béton romain

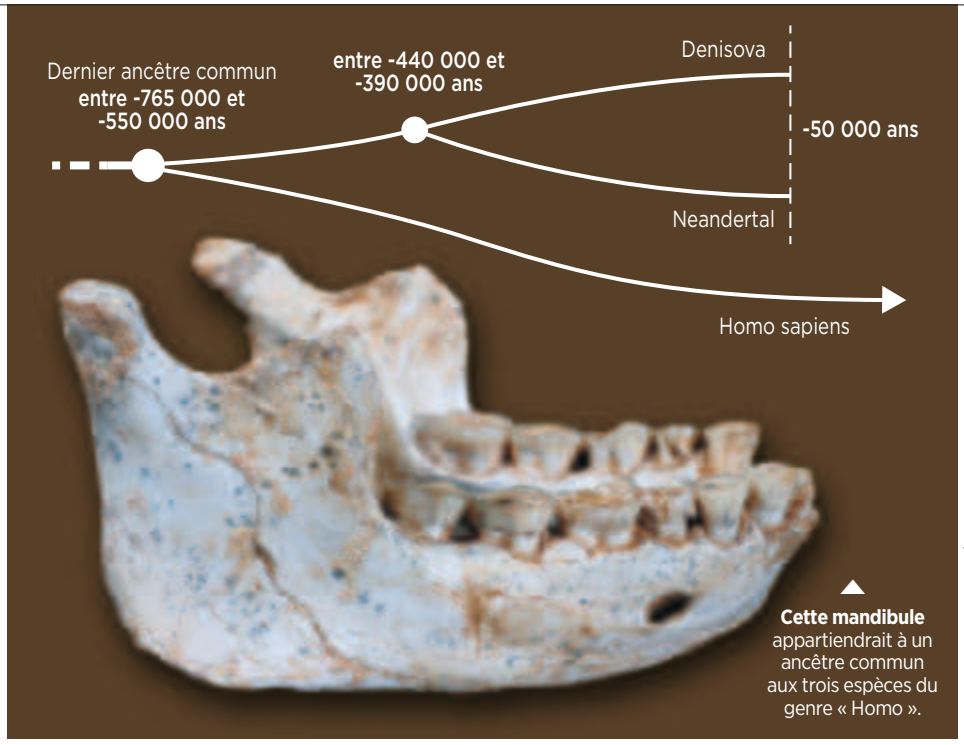
MATÉRIAU La mise au jour, à Pompéi, d'un chantier figé par l'éruption du Vésuve en 79 confirme une hypothèse récente sur les propriétés « autoréparantes » du béton romain. La découverte, dans cet atelier, d'une série de mélanges et d'un mortier prêt à l'emploi montre que les Romains incorporaient des cendres volcaniques à la chaux vive avant d'ajouter de l'eau. Cette mixture engendrait dans le matériau de petites inclusions de chaux vive qui, à la suite d'une brèche, réagissaient avec l'eau de pluie pour colmater les fissures. **F. D.**

SOURCE : E. VASERMAN, MIT, ÉTATS-UNIS.



ELLIE VASERMAN

La chaux vive présente dans le mélange colmate les fissures.



Cette mandibule appartiendrait à un ancêtre commun aux trois espèces du genre « Homo ».

HAMZA MEHMDATE, PROGRAMME PRÉHISTOIRE DE CASABLANCA - BRUNO BOURGEOIS

Des ancêtres de Sapiens et Neandertal au Maroc

Datés de 773 000 ans, les homininés extraits d'une carrière de Casablanca éclairent la divergence des lignées « Homo ».

A-t-on découvert le dernier ancêtre commun aux *Homo sapiens*, néandertaliens et dénisoviens en Afrique du Nord ? Des fossiles d'homininés mis au jour à Casablanca, au Maroc, viennent d'être datés de 773 000 ans : ils rivalisent désormais avec ceux d'*Homo antecessor*, découverts à Atapuerca (Espagne), un peu plus anciens avec leurs 800 000 ans. Leurs propriétaires, mélange de caractéristiques archaïques et modernes, ont vécu à un moment où les lignées humaines africaines et eurasiennes ont commencé à diverger selon les généticiens. La datation réalisée par une technique magnétique à haute résolution a permis de sortir du flou scientifique : la mandibule adulte était en effet connue depuis 2008, mais jusqu'alors difficile à interpréter, explique le paléoanthropologue Jean-Jacques Hublin qui a dirigé ces travaux. Selon lui, les homininés de Casablanca et d'Atapuerca se ressemblent, ce qui suggère que les deux populations ont pu être en contact antérieurement, peut-être *via* le détroit de Gibraltar : en période de glaciation, la mer était basse et certains îlots émergés facilitaient la traversée. À l'époque toutefois, il semble que ces populations avaient déjà été clairement séparées. Car la mâchoire et les dents de Casablanca, appartenant à un « Homo erectus *tardif évolué* », sont plus du type *H. sapiens* que celles d'Atapuerca, à la morphologie plus néandertalienne. Pour Jean-Jacques Hublin, *« les fossiles de la "Grotte à hominidés" sont peut-être les meilleurs candidats pour représenter les populations africaines à l'origine de l'ascendance commune de* sapiens *et de Neandertal, renforçant ainsi l'idée d'une origine profondément africaine de notre espèce ».* ■ **R. F.**

Une rare bague médiévale en or

ARCHÉOLOGIE À l'occasion de fouilles préventives à Tønsberg, au sud d'Oslo (Norvège), l'Institut norvégien de recherche sur le patrimoine culturel a mis au jour une bague en or finement ouvragé, perdue ou déposée entre 1100 et 1269, à l'endroit de l'ancienne forteresse royale de Tunsberghus. La pierre bleue est probablement du verre coloré plutôt qu'un saphir ; une couleur à laquelle étaient attribuées des valeurs protectrices et morales, notamment la préservation de la chasteté. **H. J.**

NIKU

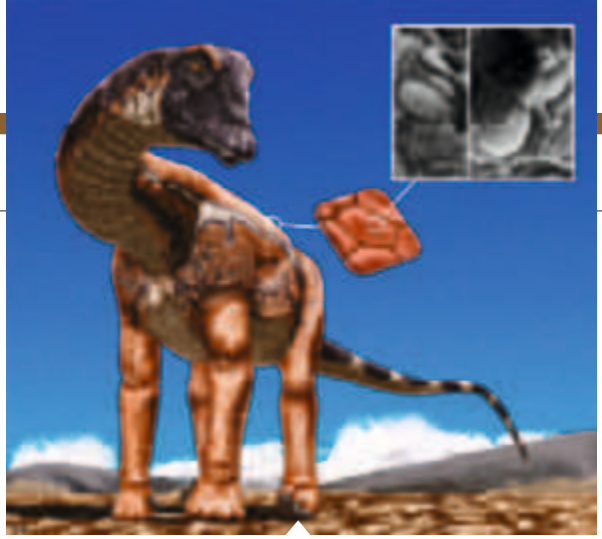
Le bijou a été mis au jour au sud d'Oslo (Norvège).

410 MILLIONS D'ANNÉES

L'âge du plus ancien lichen connu

PALÉONTOLOGIE Un fossile de quelques centimètres issu de roches datant du début du dévonien au Brésil correspond à celui d'un lichen typique : *Spongiophyton nanum*. Ce type de fossile, déjà trouvé dans plusieurs terrains des continents de l'époque, prouve que des lichens bien différenciés avaient déjà largement conquis les terres émergées. **P. K.**

SOURCE : B. BECKER-KERBER, UNIVERSITÉ DE SÃO PAULO, BRÉSIL



TESS GALLAGHER

La peau fossilisée de sauropodes analysée au microscope (en haut) a montré une pigmentation variée (vue d'artiste).

Des sauropodes hauts en couleur

PALÉONTOLOGIE Des fragments d'écaille fossilisée découverts dans le Montana (États-Unis) livrent les premiers indices directs de pigmentation chez quatre sauropodes juvéniles vieux de 145 millions d'années, probablement proches de diplodocus. Préservés en trois dimensions et observés au microscope électronique, ces tissus révèlent une diversité de mélanosomes, y compris des formes associées aux couleurs iridescentes chez les oiseaux. La palette chromatique de leurs phanères s'élargit, mais il est encore impossible de préciser leurs couleurs. **J. I.**

SOURCE : TESS GALLAGHER, UNIVERSITÉ DE BRISTOL, ROYAUME-UNI.

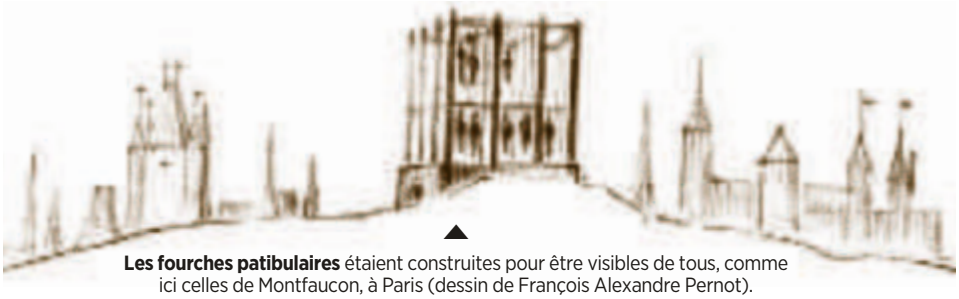
Celui qui survécut à une attaque de lion

ANTHROPOLOGIE Sur le site de Kozareva Mogila (Bulgarie), près de la mer Noire, des archéologues ont mis au jour le squelette d'un jeune homme d'une vingtaine d'années dont les os révèlent qu'il aurait survécu, il y a 6200 ans, à une attaque de lion. L'une de ses blessures est pour le moins spectaculaire : sur son crâne, un trou d'environ 22 mm traversant l'os pariétal comporte encore, à l'intérieur, un éclat osseux resté fusionné à la paroi interne. **M. B.**

SOURCE : VESELIN DANOV, ACADÉMIE DES SCIENCES BULGARE, BULGARIE.

À Grenoble, les vestiges d'un gibet du XVIe siècle

Les cadavres des suppliciés y étaient exposés après leur exécution, dans un but dissuasif.



AURIMAGES

Les fourches patibulaires étaient construites pour être visibles de tous, comme ici celles de Montfaucon, à Paris (dessin de François Alexandre Pernot).

Les vestiges d'un gibet, édifice sur lequel on exposait les cadavres des suppliciés après leur exécution, ont été identifiés par les archéologues de l'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap) en pleine ville de Grenoble. S'il est rare d'en trouver en contexte archéologique, les gibets (ou « fourches patibulaires ») n'avaient rien d'inhabituel dans les villes d'Europe et faisaient partie intégrante du système judiciaire de l'Ancien régime. Daté du milieu du XVIe siècle, celui-ci était situé à l'une des portes de Grenoble et était visible de tous, jouant un rôle dissuasif pour quiconque était tenté de désobéir au roi. C'est la position de 32 squelettes découverts près des fondations qui a convaincu les chercheurs : *« Il était clair que ces défunts avaient été délibérément privés de sépulture,* affirme Nicolas Minvielle-Larousse, responsable scientifique de la fouille. *Suspendus un certain temps au gibet, parfois plusieurs années, ils ont été déposés ou jetés dans ces fosses sans aucun soin ni geste funéraire. »* **M. B.**

Quand des dinosaures s'essayaient à la nage

Le site de Carreras Pampa en Bolivie révèle une mosaïque de comportements mêlant marche et nage.

Dans le parc national de Torotoro, en Bolivie, le site de Carreras Pampa conserve l'un des ensembles d'empreintes de dinosaure les plus denses jamais documentés. Plus de 16 000 traces y ont été recensées. Elles ont été laissées par des dinosaures théropodes à trois doigts il y a environ 70 millions d'années. Ces empreintes, réparties sur neuf secteurs, couvrent une large gamme de tailles, de moins de 10 cm à plus de 30 cm, et témoignent de comportements variés, comme la marche, la course, des virages serrés ou des frottements de queue. Mais le site se distingue surtout par l'abondance exceptionnelle de traces indiquant des phases de nage, un comportement rarement décrypté chez les dinosaures. Plus de 1300 empreintes ont été formées sous l'eau. Certaines montrent un espacement régulier, révélant des animaux prenant appui sur le fond avec leurs orteils en nageant, tandis que d'autres suggèrent un contact plus ponctuel avec le substrat. **J. I.**

ESPERANTE ET AL.

Les empreintes indiquent des phases de marche, de course, de virage et de frottements de queue.

Des abeilles nichaient dans des fossiles

PALÉONTOLOGIE Dans une grotte de République dominicaine, des chercheurs ont mis au jour un comportement inédit : des abeilles fouisseuses ont niché il y a quelques milliers d'années dans les alvéoles dentaires de fossiles âgés de 10 000 à 30 000 ans. Ces dents appartenaient à des hutias, rongeurs endémiques des Caraïbes, déposés par des chouettes effraies géantes. **J. I.** SOURCE : L. W. VIÑOLA-LÓPEZ, UNIVERSITÉ DE FLORIDE, ÉTATS-UNIS.

N. GEBHARD / ARCHAEOLOGY BASELLAND

L'une des deux pièces (recto verso) trouvées en Suisse.

Des offrandes celtiques en or

NUMISMATIQUE Comptant parmi les plus anciennes monnaies celtiques retrouvées en Suisse, deux pièces d'or ont été découvertes près d'une tourbière considérée comme sacrée à l'époque. Inspirées des statères d'or émis sous le règne de Philippe II de Macédoine, elles présentent la tête du dieu grec Apollon côté face et un char tiré par des chevaux côté pile. Datées du IIIe siècle avant notre ère, elles pourraient avoir été déposées en guise d'offrandes votives selon les archéologues du canton de Bâle. **H. J.**

Un site fortifié préhistorique en Irlande

ARCHÉOLOGIE Des relevés de télédétection par laser (lidar) ont décelé plus de 600 plateformes d'habitations présumées sur le site fortifié de Brusselstown Ring, en Irlande du Nord, soit le plus grand ensemble jamais découvert au Royaume-Uni. Le site témoigne d'une occupation continue et de constructions monumentales depuis le néolithique jusqu'à l'âge du bronze (environ 3700 à 800 avant notre ère) **H. J.**

SOURCE : DIRK BRANDHERM, UNIVERSITÉ QUEEN'S DE BELFAST, IRLANDE DU NORD.

La bipédie de Toumaï relancée

ANTHROPOLOGIE Une nouvelle protubérance a été détectée sur le fémur de Toumaï à l'endroit précis où le ligament ilio-fémoral — un stabilisateur essentiel à la bipédie — s'insère sur cet os chez l'humain. De quoi renforcer l'idée que cet ancêtre de l'humanité de 7 millions d'années se tenait sur ses deux jambes, tout en dépendant des arbres. Le débat n'est toutefois pas clos. Une équipe française a annoncé un retour sur le site de la découverte du *Sahelanthropus tchadensis* dès cette année, à la recherche de nouveaux vestiges. **R. F.**

SOURCE : SCOTT WILLIAMS, UNIVERSITÉ DE NEW YORK, ÉTATS-UNIS.

S. WILLIAMS/NYU AND J. HEATON/UNIVERSITY OF ALABAMA BIRMINGHAM

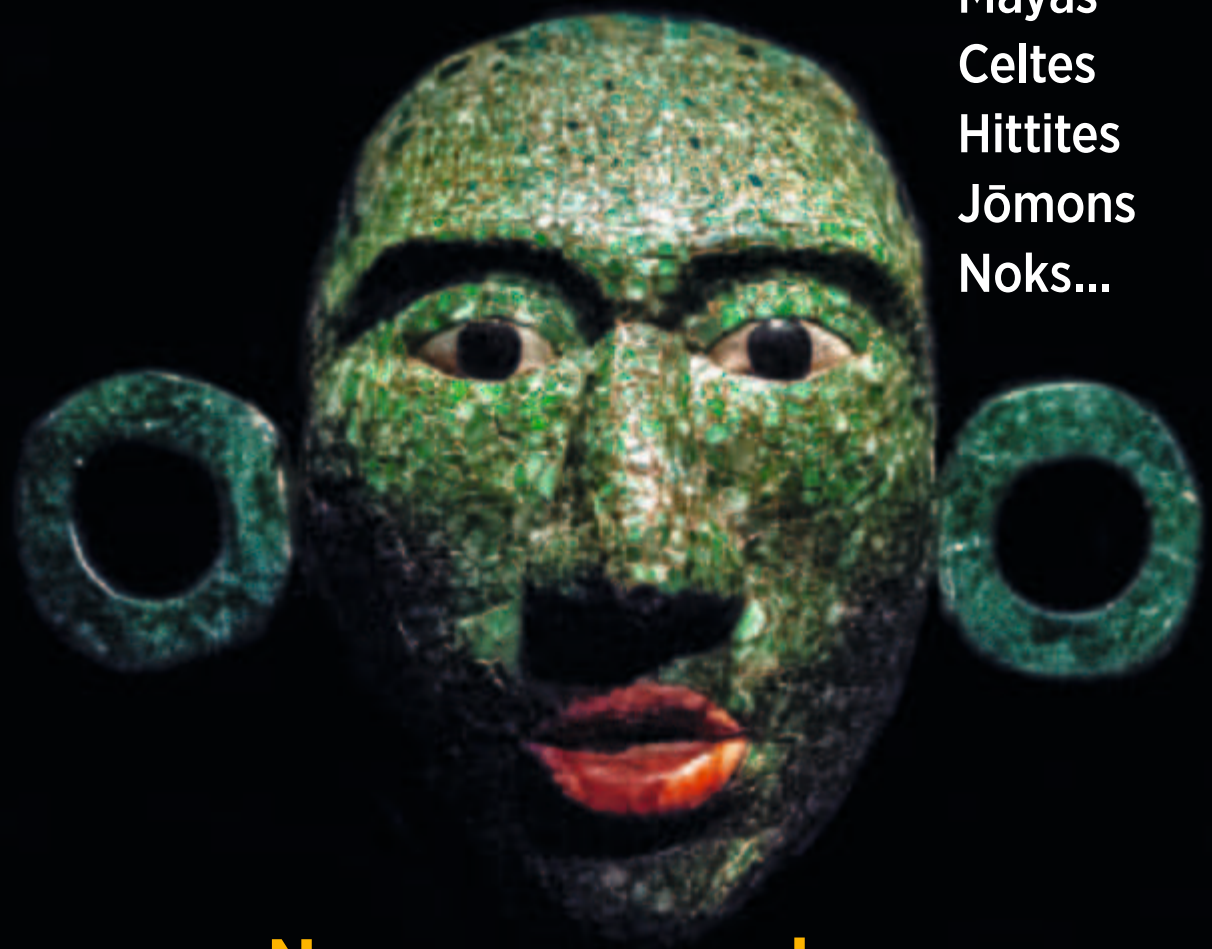
Chez votre marchand de journaux

SCIENCES ET AVENIR
LES DOSSIERS

LES DOSSIERS

SCIENCES ET AVENIR

Mayas
Celtes
Hittites
Jōmons
Noks...



Nouveaux regards sur

LES CIVILISATIONS DISPARUES

FRANCOISGUÉNET/DIVERGENCE

ANTOINE MOREAU DU SAULT POUR SCIENCES ET AVENIR

Ces IA qui se prennent pour des chercheurs

Le congrès scientifique Agents4Science d'octobre dernier devait démontrer les capacités des IA à réaliser des travaux de recherche. Il a surtout exposé nombre de leurs limites en la matière.

Pour certains, les intelligences artificielles sont appelées à dépasser le simple rôle d'outils pour devenir les égaux des chercheurs. C'est la prédiction de James Zou, professeur de science des données biomédicales à l'université Stanford (États-Unis). En juillet 2025, il publiait dans *Nature* une étude imaginée et réalisée presque exclusivement par des agents IA. Et pour enfoncer le clou, il a créé un congrès scientifique très particulier : pour seul prérequis, les travaux présentés devaient être réalisés en partie par des agents IA, pour ensuite être évalués par d'autres agents IA. *« Les revues n'acceptent toujours pas d'inclure une IA en tant qu'auteur d'une étude scientifique, nous voulons que cela change »*, justifie le chercheur.

Le congrès Agents4Science a eu lieu en ligne le 22 octobre. Les 315 études soumises ont été d'abord évaluées par des modèles de langage (Gemini 2.5 Pro, GPT-5, et Claude Sonnet 4), qui en ont validé 80. Après une deuxième validation, menée par des chercheurs en chair et en os, 48 ont été acceptées, en informatique, médecine… *« Nous voulons utiliser ce congrès expérimental pour apprendre des choses sur les qualités et les défauts des agents IA en tant que chercheurs et évaluateurs »*, explique James Zou.

POUR EN SAVOIR PLUS

▸ Lire notre entretien avec James Zou : **sciav.fr/948zou**

L'événement a, certes, mis en lumière les compétences des IA, mais aussi leurs limites : beaucoup d'hallucinations, des références inventées, et une difficulté évidente à générer de nouvelles idées scientifiques et expérimentales. *« Je ne suis pas du tout convaincue que les agents IA actuels aient la capacité de concevoir des questions scientifiques robustes qui fassent vraiment avancer le domaine »*, estime Risa Wechsler, professeure d'astrophysique à l'université Stanford, qui a participé aux évaluations.

Chacune des études mentionne à quel point l'IA a contribué à chaque étape (conception des hypothèses et du protocole expérimental, analyse des données, écriture). Sans surprise, la technologie a pris une part très importante dans l'écriture de tous les articles, moins dans les premières étapes de réflexion. Toutefois, quelques travaux ont un réel intérêt scientifique. L'un des meilleurs étudie à quel point l'implication des IA dans la recherche peut aider… à tricher ! Cette étude montre ainsi que les agents IA peuvent intégrer des consignes cachées amenant des évaluateurs IA à ne faire que des commentaires positifs. Elle souligne aussi des problèmes de fabrication de données vraisemblables (mais fausses) et l'incapacité des évaluateurs IA à les détecter. Ou le biais flagorneur qui pousse les IA à valider des études dont elles ont pourtant pointé les failles.

Utiliser l'outil en toute transparence

« Nous ne pouvons toujours pas dire qu'un agent IA puisse être l'auteur d'un article scientifique, martèle Barbara Cheifet, rédactrice en chef de *Nature Biotechnology,* lors d'une table ronde en clôture du congrès. *Cependant, plus les chercheurs seront transparents sur leur utilisation de l'IA, plus cela aidera à construire un climat de confiance autour de ces outils. »* ■ **Nicolas Gutierrez C.**

OPENAI

Chaque jour, Pulse propose des informations en lien avec l'utilisateur.

ChatGPT version proactive

PERSONNALISATION Très pratique ou dangereusement intrusive ? La version Pulse du *chatbot* d'OpenAI, pour téléphone portable Android (Google), ne nécessite plus que l'utilisateur demande quelque chose : à chaque début de journée, elle accueille ce dernier avec des contenus personnalisés, des propositions, des résumés, des rappels générés automatiquement à partir de l'historique de *chat*, de l'agenda Google ou du contenu de Gmail analysés dans la nuit. **A. D.**

IL A DIT

« Il est très facile d'évaluer [des modèles d'IA] à partir de questionnaires à choix multiples, mais si vous allez chez le médecin, celui-ci ne va pas vous ausculter par QCM. Si vous sollicitez un avocat, il ne vous donnera pas son conseil juridique sous forme de choix multiples »

Luc Rocher, professeur associé à l'université d'Oxford (Royaume-Uni) sur Newscientist.com, à propos des performances de Gemini 3 de Google. À lire sur : sciav.fr/948gem3

MICROSOFT

MAI-Image-1 peut produire des contenus très réalistes.

Le premier générateur d'images de Microsoft

CRÉATION Longtemps après Dall-E ou Midjourney, MAI-Image-1 a été lancé par Microsoft en octobre dernier pour générer des images à partir d'instructions textuelles. L'enjeu est clairement de concurrencer les modèles du même genre, ceux d'OpenAI comme de Google. MAI-Image-1 est particulièrement entraîné pour produire des contenus photoréalistes, même s'il ne s'y limite pas. L'outil est accessible depuis Bing, en version Web ou application mobile. Un menu permet à l'internaute de le choisir au même titre que Dall-E 3 et GPT-4o. **A. D.**
À tester ici : sciav.fr/948mai

BRUNO LÉVY

LA CHRONIQUE DE
JEAN-GABRIEL GANASCIA*

Les architectes de l'IA élus personnalités de l'année 2025

Tous les ans depuis 1927, au mois de décembre, le magazine américain *Time* nomme personnalité de l'année celle, celui, ceux, voire ce — il y a 43 ans, ce fut l'ordinateur — qui a incarné le mieux l'année en cours. En 2025, la distinction échut auxdits architectes de l'IA. Par là, on n'entend ni les chercheurs, ni les ingénieurs à l'origine des progrès scientifiques accomplis, mais les entrepreneurs qui investissent massivement pour en déployer un peu partout les applications. Et, à l'évidence, l'IA change bien des perspectives : on évoque des bouleversements majeurs en médecine, une amélioration sans précédent de la productivité et beaucoup d'autres belles choses encore. Ils seraient donc les clefs de la richesse, du progrès et des transformations du monde contemporain. Pour l'illustrer, la couverture du magazine s'inspire d'une photographie prise en 1932 par Charles Ebbets où l'on voit, au sommet d'un gratte-ciel de Manhattan, 11 ouvriers assis en équilibre sur une poutre au-dessus du vide en train de prendre leur casse-croûte. À leur place, ce sont huit titans de la tech au centre desquels on reconnaît aisément Jensen Huang, le fondateur de Nvidia, le fabricant de processeurs, et Sam Altman, le P-DG d'OpenAI. Apparemment, ils n'éprouvent aucun vertige à être perchés en l'air, au-dessus de l'abîme. Pourtant, même si les prouesses de l'IA sont grosses de promesses, beaucoup craignent qu'elles n'induisent toutes sortes de maux : chômage, déqualification, pollution, crise économique, etc. Rappelons que, si elle consacre une force qui a changé le monde, la nomination au titre de personnalité de l'année du *Time* n'a pas toujours été laudative. Ainsi y eut-il parmi les récipiendaires Hitler, Staline (deux fois), l'ayatollah Khomeyni… ■

* **Professeur à Sorbonne Université,** à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *L'I.A. expliquée aux humains*, Seuil, 2024.

PROGRAMME ARTEMIS

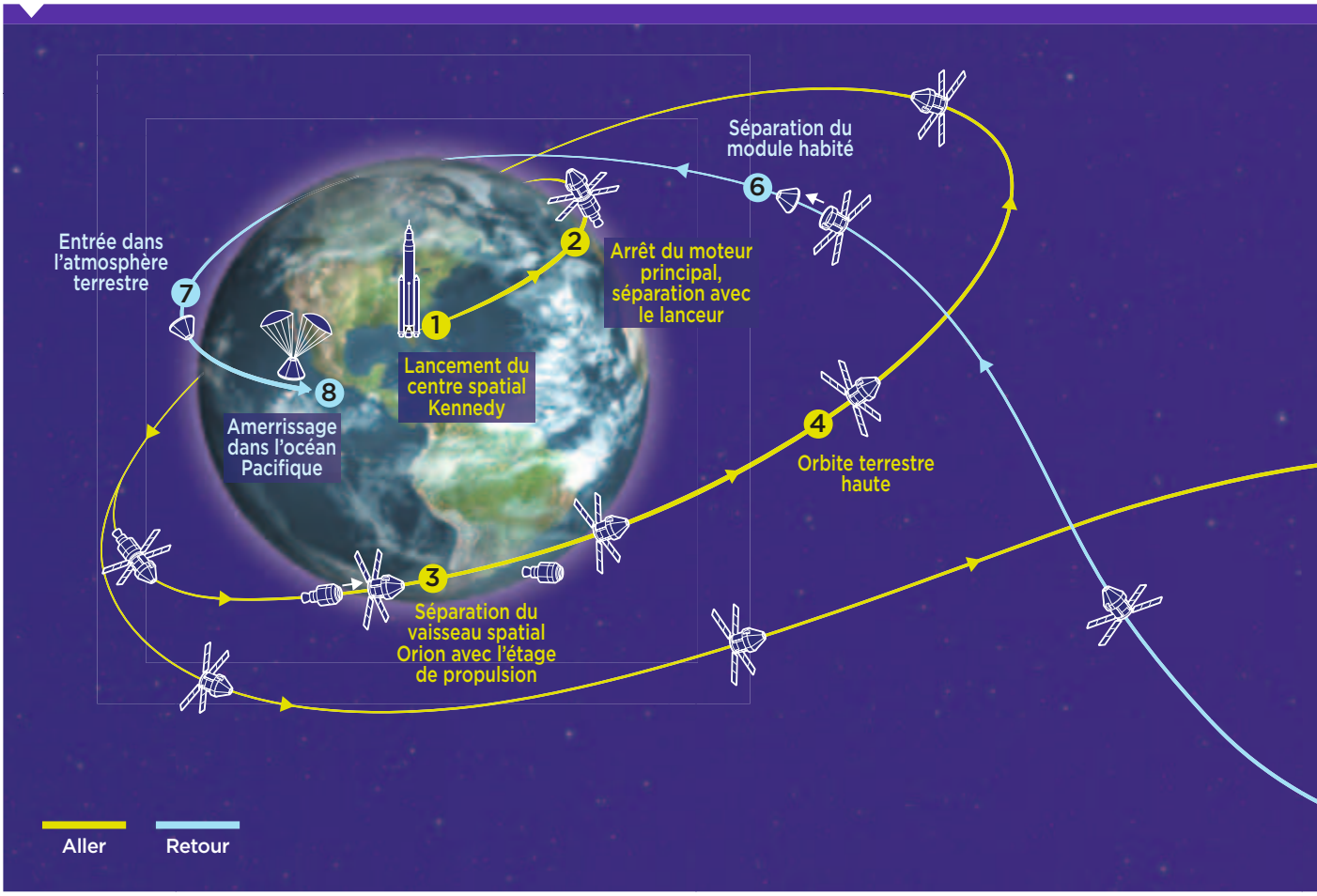
Objectif Lune

Une première depuis 1972 ! Le deuxième volet d'Artemis doit envoyer quatre astronautes autour de la Lune. Décollage prévu en février. Cet ambitieux programme de la Nasa devrait se poursuivre avec l'alunissage d'humains à partir de 2028. Retour sur les origines et les enjeux de cette nouvelle épopée spatiale.

Dossier réalisé par
Franck Daninos
et Sylvie Rouat

BILL INGALLS / NASA / SIPA

Le lanceur spatial super-lourd SLS, coiffé du vaisseau Orion qui accueillera l'équipage d'Artemis II (ici sur le pas de tir du centre Kennedy en novembre 2022, avant un vol d'essai sans équipage).
◄



BRUNO BOURGEOIS

ARTEMIS II
Le retour des humains vers la Lune

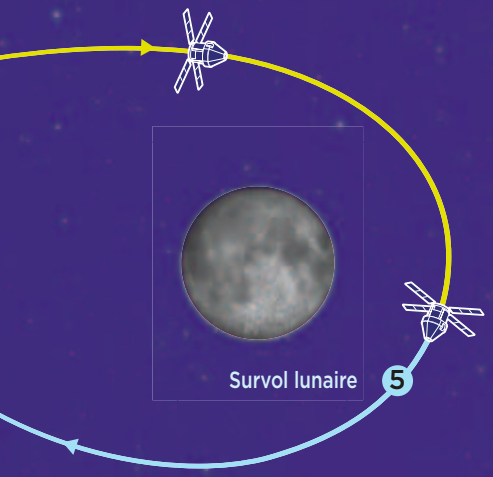
Le premier vol habité à destination de notre satellite naturel depuis 1972 devrait avoir lieu à partir de février. Ce deuxième volet du programme Artemis de la Nasa sera une répétition générale avant la mission suivante qui verra l'alunissage d'astronautes.

De la Floride à la Californie en passant par… la Lune ! Tel est le fabuleux voyage que s'apprêtent à réaliser les astronautes de la mission Artemis II, premier vol habité à destination de notre satellite naturel depuis plus d'un demi-siècle. Au moment où nous écrivions ces lignes, l'agence spatiale américaine n'avait pas encore communiqué de date précise pour le décollage, la fenêtre de tir s'ouvrant le 5 février pour s'achever *« au plus tard en avril »*, assurait la Nasa. Tout semblait fin prêt, en tout cas, pour la mise en route du deuxième volet du programme Artemis — celui qui doit acheminer quatre membres d'équipage en orbite lunaire lors d'un périple de dix jours, afin de préparer les missions ultérieures dont Artemis III, prévue pour le moment en 2028 avec l'alunissage d'astronautes sur la surface grisâtre et inhospitalière de l'astre de nuit.

« Même si la Nasa a déjà réalisé neuf vols lunaires habités entre 1968 et 1972 lors

Une mission inédite de 10 jours

Après avoir réalisé deux orbites autour de la Terre pour des essais de matériel, les quatre astronautes de la mission Artemis II s'élanceront vers la Lune. Un voyage de quatre jours pour la contourner à 10 000 km d'altitude avant d'entamer le vol retour.



CNES/FMALIGNE

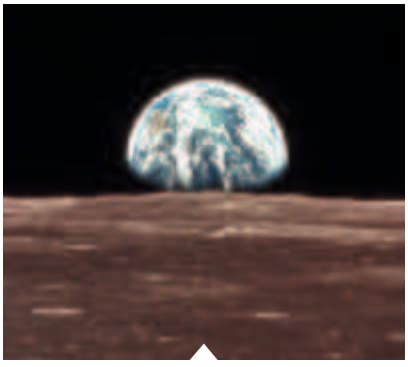
« Si la Nasa a déjà réalisé des vols lunaires habités, cette expédition à 380 000 km de la Terre reste d'une extraordinaire complexité »

Jean Blouvac, responsable des programmes Exploration et vol habité au Centre national d'études spatiales (Cnes)

du programme Apollo, dont six alunissages, ce type d'expédition à 380 000 km de la Terre reste d'une extraordinaire complexité », insiste Jean Blouvac, responsable des programmes Exploration et vol habité au Centre national d'études spatiales (Cnes). Le dispositif actuel repose par ailleurs sur des fusées et véhicules plus puissants et perfectionnés qu'à l'époque d'Apollo, qu'il faut tester de façon aussi rigoureuse que possible afin de garantir leur bon fonctionnement et, surtout, la sécurité des astronautes. Or, le programme Artemis a déjà connu d'importants surcoûts et retards. Dans le contexte d'une compétition exacerbée avec la Chine et ce qui s'apparente de plus en plus à une nouvelle course à l'espace, la Nasa n'a ainsi pas le droit à l'erreur. *« Artemis II est une étape cruciale pour l'ensemble du programme et l'ambition américaine d'établir une présence humaine durable sur la Lune »*, avertit l'ingénieur.

Contrairement aux missions Apollo où les équipages n'avaient séjourné que quelques dizaines d'heures sur le sol lunaire pour planter un drapeau américain et réaliser des expériences scientifiques (collecte d'échantillons, étude des poussières, etc.), l'objectif est de s'implanter cette fois de façon pérenne. Les grandes lignes ont été posées en 2017 lors du premier mandat de Donald Trump. Elles prévoient alors non seulement de nouveaux alunissages, mais aussi la construction d'une station lunaire en orbite (Lunar Gateway) faisant office de relais entre la Terre et la Lune. Ce point d'appui permettrait d'effectuer des missions beaucoup plus longues et répétées sur notre compagne céleste et d'y acheminer peu à peu toute une série d'équipements visant à étudier puis exploiter les ressources *in situ* : glace d'eau au niveau du pôle sud, minéraux, éléments rares, etc. Cette plateforme servirait également de tremplin et d'étape d'apprentissage pour des missions plus lointaines, des vols habités vers Mars notamment.

Baptisé Artemis en référence à la déesse grecque associée à la Lune et sœur d'Apollon, ce programme qui remet l'astre de la nuit sur le devant de la scène vise à fournir, *« après les renoncements et arbitrages jugés ambigus de l'administration précédente, des objectifs clairs et concrets à la politique spatiale américaine »*, explique Paul Wohrer, de l'Institut français des relations internationales. *« L'idée est de créer une nouvelle dynamique, une mobilisation de tous les acteurs du domaine »*, analyse le chercheur.


NASA/SPL/SUCRÉ-SALÉ

Lever de Terre vu depuis la Lune. Photographie prise lors de la mission Apollo 11, en 1969.

La fusée la plus puissante jamais conçue par la Nasa

La Nasa est le fer de lance et principal pivot de cette politique. *« Le projet doit associer les grands groupes de l'industrie spatiale américaine, anciens comme nouveaux, tout en développant des coopérations avec les alliés traditionnels des États-Unis, tels le Canada et l'Europe, ainsi que des accords internationaux sur l'exploration future de la Lune »*, ajoute Paul Wohrer *(lire p. 38)*.

Au premier rang des éléments indispensables à la mise en œuvre d'Artemis, figure le lanceur super-lourd Space Launch System (SLS), équivalent de la fusée géante Saturn V qui transporta les équipages d'Apollo vers la Lune. La construction de l'étage central du SLS, dont les moteurs doivent brûler près de 3 millions de litres d'oxygène et d'hydrogène liquides, a été confiée à l'avionneur Boeing. La compagnie Northrop Grumman a fabriqué pour sa part les deux gigantesques propulseurs à propergol solide accolés au tronc principal. Dérivés de ceux qui équipaient les navettes spatiales américaines jusqu'en 2011, ils confèreront au SLS 75 % de sa puissance lors des premières minutes du

lancement. Avec ses 97 mètres de hauteur et une poussée frisant 4000 tonnes au décollage, le SLS est *« la fusée la plus puissante et la plus performante jamais conçue par la Nasa »*, se félicite cette dernière. C'est grâce à la force brute de ce colosse de métal que les équipages d'Artemis — et par la suite les pièces les plus lourdes de la station Gateway — s'extirperont de la partie épaisse de notre atmosphère pour se mettre en chemin vers la Lune.

Les astronautes voyageront eux-mêmes à bord du vaisseau Orion placé au sommet du SLS. D'une masse totale de 27 tonnes, il comprend trois parties. Un module de commande, tout d'abord, développé par Lockheed Martin, dont le volume habitable de 9,3 m^3 peut accueillir quatre astronautes — soit un de plus que les capsules d'Apollo. Un module de service conçu par l'Agence spatiale européenne est fixé au-dessous. *« C'est une brique essentielle du dispositif,* signale Jean Blouvac. *Elle fournit à Orion les systèmes de propulsion, d'orientation et d'énergie, ainsi que l'oxygène, l'eau et les équipements thermiques indispensables à l'équipage.* » Le troisième élément est une tour de sauvetage installée au-dessus d'Orion. Composée de trois moteurs autonomes, c'est un peu l'assurance-vie des astronautes qui n'existait pas dans les anciennes navettes spatiales : *« Elle permet d'arracher le vaisseau au lanceur en cas d'explosion ou de défaillance grave »*, explique Jean Blouvac.

C'est à l'entreprise SpaceX d'Elon Musk, enfin, qu'est confiée en 2021 la conception du véhicule chargé de déposer les astronautes et équipements techniques sur la Lune. Dénommé Starship HLS (Human Landing System), il est censé s'amarrer en orbite lunaire à Orion ou à la future station Gateway pour récupérer deux membres d'équipage, les faire alunir puis les ramener dans leur vaisseau d'origine. Mais, alors que le lanceur SLS et Orion s'appuient sur les programmes spatiaux précédents, le Starship HLS requiert des technologies inédites. *« Il doit être notamment ravitaillé en orbite terrestre afin d'avoir assez de carburant pour rejoindre la Lune et y atterrir,* pointe Francis Rocard, responsable des programmes d'exploration du Système solaire au Cnes. *Or de telles opérations, jamais encore réalisées dans l'espace, posent d'immenses difficultés. » (lire p. 36).*

Mais les défis ne sont pas que d'ordre technologique. Car la Nasa doit composer désormais avec une variété d'acteurs, publics comme privés à l'instar de SpaceX, et un ensemble de pays dans le cadre des partenariats internationaux : des coopérations parfois difficiles à bien maîtriser, qui prennent aussi davantage de temps que lorsqu'on agit seul.

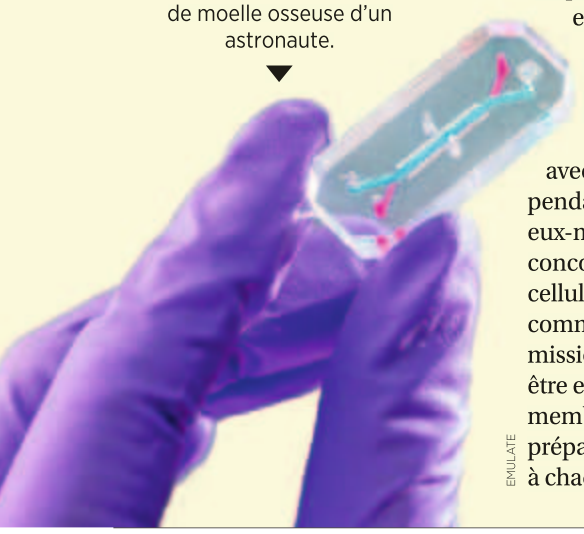
La compétition avec la Chine a remplacé celle avec l'URSS

Par ailleurs, même si Artemis est plus ambitieux qu'Apollo, il ne bénéficie pas du même soutien financier. Apollo avait coûté en effet l'équivalent de près de 300 milliards de dollars, contre 93 jusqu'ici pour Artemis. Alors que la Nasa absorbe actuellement 0,5 % du budget fédéral, ce pourcentage s'élevait à 4,5 % au moment d'Apollo, *« ce qui représente un effort énorme »*, relève Paul Wohrer. Le contexte international était certes très différent. Lorsque le président John F. Kennedy déclara, en mai 1961, que les États-Unis devaient envoyer un homme sur la Lune avant la fin de la décennie, ceux-ci s'étaient engagés dans une bataille existentielle et idéologique contre le bloc communiste. *« Or en 1957, l'Union soviétique avait lancé le premier satellite artificiel dans l'espace, Spoutnik, puis réalisé avec Youri Gagarine le premier vol spatial habité en avril 1961 »*,

EXPÉRIENCE

Avatars d'astronautes

Pas plus grands qu'une clé USB, des dispositifs contenant des cellules de moelle osseuse prélevées sur les astronautes d'Artemis II voyageront avec eux vers la Lune. Ces « organes sur puce » seront alimentés par des canaux microscopiques fournissant l'oxygène et les nutriments nécessaires au métabolisme des cellules. Dénommée Avatar (A virtual astronaut tissue analog response), l'expérience testera les effets de la microgravité et des rayonnements spatiaux sur les tissus humains, de façon très personnalisée. Les mesures seront comparées avec les analyses réalisées pendant le vol sur les astronautes eux-mêmes. Si les données concordent, de tels « avatars » cellulaires seront considérés comme de bons analogues. Lors de missions à venir, ils pourraient ainsi être envoyés dans l'espace avant les membres d'un équipage afin de préparer des kits médicaux propres à chaque individu.



Chaque puce contiendra des cellules de moelle osseuse d'un astronaute.

EMULATE

LOCKHEED MARTIN

La capsule Orion, conçue pour transporter l'équipage, lors de tests d'ouverture avec l'astronaute Christina Koch.

rappelle Paul Wohrer. Face à ces succès considérés comme des symboles très forts de la supériorité technologique de l'URSS, Apollo visait ainsi à restaurer le prestige international des États-Unis et leur *soft power*. C'est aujourd'hui la Chine qui apparaît comme leur grand rival. *« Mais cette compétition ne possède pas le caractère vital et idéologique du temps de la guerre froide : elle ressemble davantage à un affrontement classique de puissances,* décrypte le politologue. *Même si le programme lunaire de la Chine avance à grands pas, avec la volonté de déposer des astronautes sur la Lune avant 2030, il ne suscite pas pour le moment, aux États-Unis, un sentiment d'urgence nationale.* » Le rapport au risque n'est lui aussi pas du tout le même. *« C'est l'une des différences majeures avec le programme Apollo* », observe le Franco-Américain Charles Frankel, géologue de formation, qui a rencontré la plupart des astronautes ayant marché sur la Lune. Dans les années 1960, la course spatiale avec l'URSS justifiait en effet d'immenses prises de risque. Lors du lancement d'Apollo 8, premier vol habité en orbite lunaire en 1968, *« la Nasa ne donnait à ses astronautes qu'une chance sur deux de revenir vivants* », note-t-il. Ce qui est impensable aujourd'hui : *« Un accident comme celui qui frappa Apollo 1 en 1967, où trois astronautes périrent brûlés sur le pas de tir, mettrait sans doute fin au programme Artemis* », estime Charles Frankel.

CNES/C. PEUS

« Un angle de rentrée dans l'atmosphère trop faible fera repartir le vaisseau dans l'espace ; un angle trop raide le détruira »

Francis Rocard, responsable des programmes d'exploration du Système solaire au Cnes

Toutes ces difficultés ont fait prendre beaucoup de retard au projet américain. Selon le calendrier initial, les astronautes d'Artemis III auraient dû fouler le régolithe lunaire… en 2024 ! Lancée en 2022 après plusieurs années de report, la mission inaugurale Artemis I a été néanmoins un succès. Objectif : un vol sans équipage faisant le tour de la Lune avant de revenir sur Terre, afin de tester en conditions réelles la fusée SLS et Orion.

De nombreuses étapes à valider pour la sécurité des astronautes

« Le seul bémol a concerné le bouclier thermique de la capsule », note Francis Rocard. Lors de la rentrée atmosphérique où les forces de friction font grimper la température à près de 3000 °C, cette coque a subi une érosion plus importante que prévu. Pour la minimiser, la Nasa ajustera ainsi très légèrement la trajectoire de rentrée d'Artemis II. *« C'est pour cela qu'on procède par étapes,* indique-t-il. *On n'envoie pas des hommes sur la Lune sans avoir validé tout le système qui fera un aller-retour entre la Terre et la Lune : d'abord à vide et à présent avec*

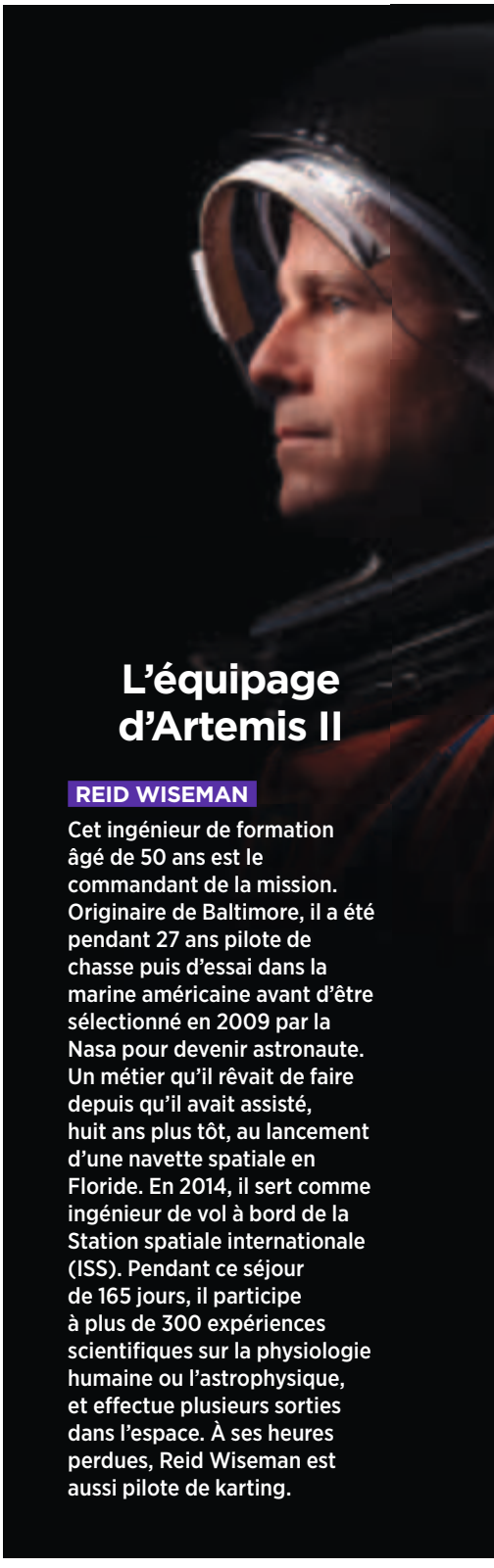
les astronautes de la mission Artemis II, qui est un peu l'équivalente d'Apollo 8. » Sélectionné en 2023, l'équipage est constitué des Américains Reid Wiseman, Christina Koch et Victor Glover, et du Canadien Jeremy Hansen *(voir leur portrait ci-contre)*. Ils auront le privilège de réaliser le vol spatial habité le plus lointain depuis 1972 ! *« Mille fois plus,* fait remarquer Jean Blouvac, *que jusqu'à la Station spatiale internationale »*, où des astronautes séjournent à 400 km de la Terre depuis une vingtaine d'années. La mission s'élancera du centre spatial Kennedy en Floride (États-Unis). Deux minutes après le décollage, les boosters du SLS seront vides et se sépareront de l'étage principal, tout comme la tour de sauvetage d'Orion. Six minutes plus tard, le corps central sera largué à son tour. La partie supérieure du SLS accrochée à Orion entamera alors un premier tour de la Terre, d'un jour environ, où les astronautes vérifieront les systèmes critiques du vaisseau. Le lendemain, une seconde révolution sera effectuée dans une orbite plus large, jusqu'à 60 000 km de la Terre. *« Orion se détachera alors de l'élément restant du SLS,* indique Jean Blouvac. *Des manœuvres d'éloignement et de rapprochement avec celui-ci permettront de tester le système de pilotage, y compris manuel, en prévision des futurs amarrages avec le véhicule d'alunissage ou la station Gateway. »*

> Sélectionné en 2023, l'équipage aura le privilège de réaliser le vol spatial habité le plus lointain depuis 1972

Retour vers la Terre à près de 40 000 km/heure

Puis les astronautes actionneront les moteurs d'Orion pour foncer vers la Lune. *« Les dés seront alors jetés »*, souligne Charles Frankel, car la capsule s'inscrira dans une trajectoire de retour libre régie uniquement par les forces gravitationnelles de la Terre et de la Lune. Le survol de l'astre sélène débutera quatre jours plus tard. Depuis les hublots, les astronautes pourront admirer les fameuses « mers lunaires », en réalité d'anciens épanchements de lave, ainsi que les montagnes escarpées et les nombreux cratères d'impact. Lorsqu'ils passeront de l'autre côté de la Lune au niveau de sa face cachée, *« ils devraient orbiter à plus de 10 000 km de la surface lunaire et décrocher ainsi le record de distance pour un vol spatial habité,* signale Jean Blouvac, *les survols d'Apollo se faisant à une centaine de kilomètres d'altitude »*. La Terre ne sera alors plus visible et les communications resteront coupées pendant une quarantaine de minutes. Puis quand Orion aura fini de contourner la Lune, notre planète réapparaîtra au-dessus de l'horizon lunaire. L'équipage s'émerveillera alors de ce sublime « lever de Terre » — *« le même qui fut photographié par les astronautes d'Apollo 8 et bouleversa les consciences en montrant une petite sphère bleue fragile et isolée dans l'obscurité de l'espace »*, rappelle Charles Frankel.

Sur le chemin du retour, Orion filera à près de 40 000 km/h en direction de la Terre. Après s'être séparée du module de service, la capsule commencera à freiner en réalisant un petit rebond sur l'atmosphère terrestre. *« L'angle de rentrée est critique,* avertit Francis Rocard. *Trop faible, le rebond fait repartir le vaisseau dans l'espace ; trop raide, il le détruit complètement. »* Lorsque la capsule plongera pour de bon, les forces de friction réduiront considérablement sa vitesse, jusqu'à un peu plus de 1000 km/h. Puis, à environ 15 km d'altitude, une série de 11 parachutes seront peu à peu déployés. Orion aura alors suffisamment ralenti pour amerrir en douceur au large de la Californie. Les astronautes auront parcouru en tout plus d'un million de kilomètres au terme de cette prodigieuse odyssée. ■ **F. D.**



L'équipage d'Artemis II

REID WISEMAN

Cet ingénieur de formation âgé de 50 ans est le commandant de la mission. Originaire de Baltimore, il a été pendant 27 ans pilote de chasse puis d'essai dans la marine américaine avant d'être sélectionné en 2009 par la Nasa pour devenir astronaute. Un métier qu'il rêvait de faire depuis qu'il avait assisté, huit ans plus tôt, au lancement d'une navette spatiale en Floride. En 2014, il sert comme ingénieur de vol à bord de la Station spatiale internationale (ISS). Pendant ce séjour de 165 jours, il participe à plus de 300 expériences scientifiques sur la physiologie humaine ou l'astrophysique, et effectue plusieurs sorties dans l'espace. À ses heures perdues, Reid Wiseman est aussi pilote de karting.

VICTOR GLOVER

Astronaute depuis 2013, il sera chargé de piloter la capsule Orion et de réaliser notamment des tests de manœuvrabilité manuelle en orbite terrestre avant que le vaisseau ne file vers la Lune. Premier Afro-Américain à participer à un vol lunaire habité, il avait déjà été, en 2020, à 44 ans, le premier astronaute noir à effectuer un séjour de longue durée dans l'ISS. Avant d'être recruté par la Nasa, ce natif de Californie, formé à l'ingénierie des systèmes et la science des opérations militaires, a été pilote de chasse dans l'US Navy. Il accumula alors plus de 3000 heures de vol sur plus de 40 aéronefs et participa à une vingtaine de missions dans des zones de conflit.

CHRISTINA KOCH

Avec 328 jours passés dans l'ISS entre 2019 et 2020, Christina Koch détenait déjà le record du plus long vol continu dans l'espace pour une femme. À cette occasion, elle avait réalisé aussi la première sortie extravéhiculaire entièrement féminine, pendant plus de 7 heures, afin de réparer une pièce défectueuse du système d'alimentation. Mais avec Artemis II, cette spécialiste en génie électrique et instruments spatiaux de 46 ans s'apprête surtout à devenir la première femme à participer à une mission lunaire habitée. *« C'est une exploratrice dans l'âme »*, relève Charles Frankel. Avant de devenir astronaute, l'Américaine a réalisé en effet plusieurs hivernages dans des régions reculées, dont un séjour d'un an dans la base Amundsen-Scott, à 250 mètres du pôle Sud.

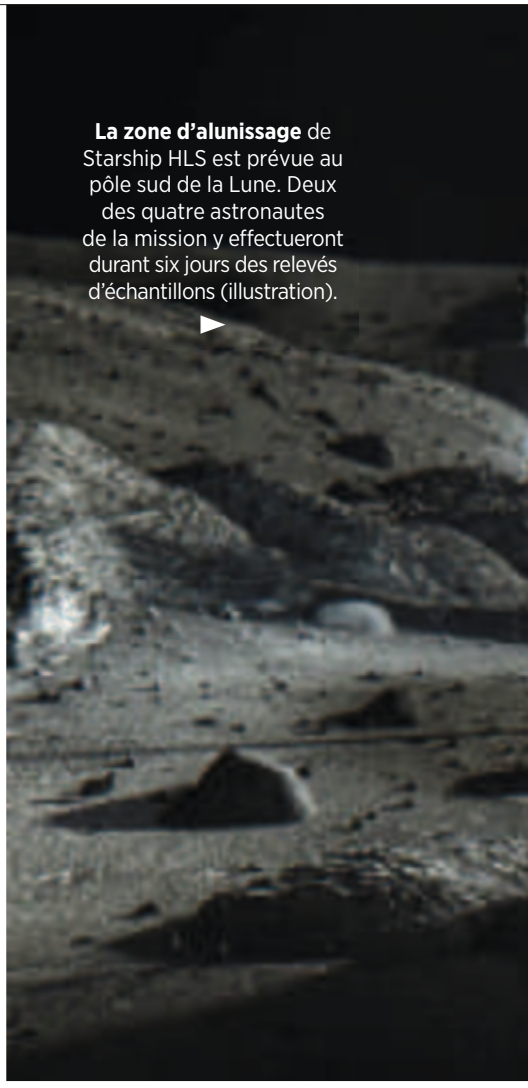
JEREMY HANSEN

Né en 1976 dans l'Ontario, le Canadien *« incarne la dimension internationale du programme Artemis et sera le premier non-Américain à voyager en orbite lunaire »*, explique Charles Frankel. Passionné de voile, de vélo de haute montagne et de géographie, cet ancien pilote de chasse élevé au grade de colonel a servi pendant 12 ans dans les forces aériennes du Canada. Recruté en 2009 par l'agence spatiale de son pays, il est le seul membre d'équipage d'Artemis II à n'avoir encore jamais volé dans l'espace. En 2013, Jeremy Hansen avait participé à une expédition souterraine de six jours dans des grottes de Sardaigne, et l'année suivante à des simulations sous-marines d'exploration de l'espace lointain au large de Key Largo, en Floride.

DANIEL O'NEAL / NASA

ARTEMIS III
La course au sol lunaire

La troisième partie du programme Artemis devrait permettre aux Américains de fouler à nouveau le sol de la Lune. Avec, dans la décennie suivante, l'ambition d'établir une base durable. Un défi technique et géopolitique.



La zone d'alunissage de Starship HLS est prévue au pôle sud de la Lune. Deux des quatre astronautes de la mission y effectueront durant six jours des relevés d'échantillons (illustration).

« *Alors que nous quittons la Lune et Taurus-Littrow, nous partons comme nous sommes venus et, si Dieu le veut, comme nous reviendrons : avec la paix et l'espoir pour toute l'humanité.* » Tandis qu'il prononçait ces mots au bas de l'échelle du module lunaire qu'il s'apprêtait à remonter, le 14 décembre 1972, le commandant d'Apollo 17, Gene Cernan, aura été le dernier homme à marquer le sol sélène de son empreinte à ce jour. Sa promesse, qui clôturait l'ère Apollo, est demeurée lettre morte pendant plus d'un demi-siècle. Mais aujourd'hui, la Nasa se prépare à faire atterrir à nouveau un vaisseau habité sur notre satellite dans le cadre du programme Artemis.

Et ce, dès la troisième mission, programmée à ce jour pour 2028. Si tout se passe comme prévu, le lanceur lourd américain SLS propulsera le vaisseau Orion et son équipage de quatre astronautes sur une trajectoire de transit vers la Lune. Après quatre ou cinq jours de route, Orion se placera en orbite lunaire, puis s'amarrera au vaisseau Starship HLS (pour « Human Landing System » — système d'atterrissage habité) déjà en place sur la même orbite.

C'est la compagnie SpaceX qui a été mandatée par la Nasa pour fournir ce système d'alunissage, très ambitieux : d'une hauteur d'environ 50 mètres, il devrait présenter un volume pressurisé habitable d'environ 600 m^3, particulièrement généreux par rapport aux autres modules lunaires historiques. Cela offrira une grande zone de vie interne pour l'équipage, des espaces de travail scientifique, une zone médicale et des espaces de stockage capables de transporter des rovers, par exemple. Il promet une capacité d'emport allant jusqu'à 100 tonnes de charge utile sur le sol lunaire, ce qui est énorme en comparaison des landers de l'ère Apollo, et peut rester jusqu'à 100 jours en orbite lunaire en attendant l'équipage.

600
mètres cubes
(environ) le volume pressurisé habitable du vaisseau Starship HLS, contre 388 m^3 pour la Station spatiale internationale.

Il en découle une masse importante, qui explique que Starship HLS ne peut rallier directement la Lune après son lancement. Pour disposer de suffisamment d'ergols pour se poser sur la Lune et remonter en orbite, il doit d'abord être ravitaillé en orbite basse terrestre par plusieurs ravitailleurs réutilisables avant de partir vers la Lune — ce transfert de méthane et d'oxygène liquide est une innovation majeure du concept.

Des températures allant jusqu'à -240 °C

Après avoir rempli son réservoir, le Starship rejoindra de manière autonome, en six jours environ, l'orbite lunaire, où il attendra l'équipage d'Artemis III. « *Une fois les deux vaisseaux arrivés en orbite lunaire [...], Orion s'amarrera au système d'alunissage habité Starship en vue de la première expédition lunaire du XXIe siècle* », indique la Nasa. Deux astronautes doivent ensuite descendre à la surface lunaire, tandis que les deux autres demeureront à bord du

AXIOM SPACE

vaisseau le temps d'une orbite complète autour de la Lune : soit environ 6,5 jours, le temps dédié à cette première expédition du programme Artemis autour du pôle sud de notre satellite naturel.

La Nasa a en effet ciblé cette destination pour l'ère Artemis. Certes, les conditions qui y règnent sont extrêmes, mais cette région encore largement inexplorée présente un grand intérêt scientifique et géopolitique. Le pôle sud abrite en effet des cratères plongés dans une ombre permanente depuis des milliards d'années. Ces zones, dont les températures oscillent entre –170 à –240 °C, ont pu piéger et conserver des matériaux primitifs — poussières et autres molécules issues de comètes ou du vent solaire. Elles constitueraient une archive naturelle permettant d'étudier la formation de la Lune et l'évolution du Système solaire interne. Le pôle sud recèlerait par ailleurs des gisements de glace d'eau dans certains cratères, susceptibles de fournir de l'eau potable et d'être transformés en oxygène pour soutenir la vie dans une station lunaire, ou d'être décomposée en hydrogène et oxygène pour produire du carburant en vue d'un voyage plus lointain, vers Mars notamment. Le pôle sud présente également des crêtes quasi constamment éclairées — dénommées « pics de lumière éternelle » — qui pourraient assurer une production stable d'énergie solaire. Cette région apparaît donc comme le meilleur candidat pour l'installation d'une base lunaire permanente. Par conséquent, celui qui s'y implantera en premier bénéficiera d'une maîtrise de l'accès aux ressources critiques que sont l'eau et l'énergie. Cela en fait un nouveau terrain de rivalités entre grandes puissances spatiales, américaine et chinoise en particulier, qui poursuivent peu ou prou le même calendrier.

Le pôle sud a été ciblé par la Nasa en raison de son grand intérêt scientifique et géopolitique

À l'issue de cette première mission de surface du programme Artemis, les astronautes remonteront à bord de Starship et rejoindront le vaisseau Orion et les astronautes demeurés en orbite lunaire. L'équipage au complet reviendra sur Terre à bord du module de service européen couplé avec la capsule Orion, qui assurera seule la rentrée atmosphérique — le Starship ayant été abandonné en orbite lunaire.

Après Artemis III, devrait être lancée l'une des étapes clés du programme Artemis, l'assemblage de la Lunar Gateway, une station spatiale cislunaire destinée à l'accueil d'équipages de quatre personnes pour une durée d'environ un mois. Cette station est conçue comme un avant-poste spatial où l'on pourrait apprendre à vivre loin de l'orbite terrestre et y réaliser des manœuvres et autres expérimentations en vue de se préparer à un futur voyage vers Mars. Dans un premier temps, elle devrait d'abord permettre d'organiser des expéditions sur la surface sélène.

Le lancement des modules PPE (Power and propulsion element) et Halo (Habitation and logistics outpost) constituera l'embryon de la Gateway. Les panneaux solaires du premier doivent fournir l'énergie nécessaire à la propulsion et au maintien en orbite de la station, ainsi que les fonctions de télécommunications avec la Terre et la Lune, tandis que le module Halo offrirait à la fois un quartier d'habitation, le commandement de la station et des ports d'amarrage pour accueillir les vaisseaux en provenance de la Terre et ceux destinés à rejoindre la surface lunaire.

LOCKHEED MARTIN

Les deux vaisseaux Starship HLS et Orion s'amarreront une fois placés en orbite lunaire (vue d'artiste).

Un nouveau rover lunaire sera testé par Artemis V

La mission Artemis IV doit ensuite permettre d'augmenter le volume habitable de Gateway à 125 m^3, en adjoignant le module européen I-Hab (International habitation module) au module Halo. Ce premier équipage à séjourner à bord de Gateway devrait par ailleurs effectuer la première campagne d'exploration lunaire à partir de cette lointaine auberge. La mission suivante, Artemis V, continuera l'assemblage de la station en y ajoutant notamment le module européen Esprit, qui comprend deux éléments : Lunar Link, chargé des communications entre la Gateway et la surface lunaire, et Lunar View, qui assure le ravitaillement de la station en xénon et en ergols chimiques. Lunar View dispose aussi d'un volume pressurisé doté de six larges fenêtres panoramiques, ainsi que d'un espace logistique pour le fret et les consommables de l'équipage. L'équipage d'Artemis V devrait aussi tester, lors d'une descente sur notre satellite, un nouveau rover lunaire censé allonger la durée des sorties et augmenter le périmètre des explorations.

Au cours de la prochaine décennie, la mission Artemis VI devrait ensuite livrer et intégrer le Crew and science airlock module, un sas destiné aux activités

CONQUÊTE SPATIALE

L'histoire mouvementée du programme lunaire américain

Lorsque s'achève l'ère Apollo, au début des années 1970, la vision américaine de l'avenir de l'exploration spatiale est ambitieuse. L'objectif est alors d'instaurer une présence humaine permanente en orbite terrestre au sein d'une grande station spatiale, et ce dès les années 1980. Skylab, première station lancée par la Nasa en 1973, est alors pensé comme un premier prototype. La Lune, pense-t-on, va devenir une destination régulière, avec la construction progressive de bases semi-permanentes avant l'an 2000. Le lanceur Saturn V est vu comme le premier d'une famille de fusées géantes, de véhicules réutilisables et de « remorqueurs spatiaux » entre les orbites terrestre et lunaire. Dès 1969, juste après Apollo 11, la Nasa envisage d'envoyer des missions habitées vers Mars entre 1985 et 2000. La planète Rouge est alors perçue comme la suite naturelle de la conquête spatiale. Cependant, cette vision s'est vite effritée, l'URSS ayant été battue dès Apollo 11 dans la course à l'espace. Sans rival direct, face à un désintérêt du public, et alors que les États-Unis s'enlisent dans la guerre du Vietnam, il devient difficile de justifier de dépenser des milliards de dollars pour refaire la même chose.

scientifiques proposé par les Émirats arabes unis et fabriqué par Thales Alenia Space, en échange de la promesse d'envoi d'un astronaute émirati à bord d'une future mission lunaire d'Artemis. Tous ces modules devraient demeurer largement inoccupés, à la différence de la Station spatiale internationale, habitée sans discontinuer depuis plus de vingt-cinq ans. Ils sont donc conçus pour fonctionner de manière autonome et effectuer des opérations à distance, grâce des interfaces robotiques et un bras articulé canadien.

À plus long terme, la Nasa prévoit d'établir une présence humaine au long cours sur la Lune, ce qui nécessiterait d'y construire une base lunaire pour des séjours prolongés. Dans cette perspective, plusieurs pistes sont étudiées. Il est ainsi imaginé d'utiliser l'impression 3D à base de régolithe lunaire comme matériau de construction. Une autre option consiste à exploiter les vastes tunnels de lave détectés sous la surface lunaire. Des observations réalisées par la sonde américaine Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) apportent en effet des indices solides de l'existence d'un réseau de tunnels creusés par d'anciennes coulées de lave en fusion. Ces cavités, situées sous plusieurs dizaines de mètres de basalte, pourraient être bien plus vastes que celles que nous connaissons sur Terre et offriraient de surcroît une protection efficace contre les rayonnements cosmiques, les micrométéorites et les fortes variations de température, de +120 °C le jour à -170 °C la nuit, et jusqu'à -240 °C dans les zones les plus froides.

À plus long terme, la Nasa prévoit de construire une base lunaire pour des séjours prolongés

Si le programme Artemis se présente ainsi sous des dehors enthousiasmants, les nuages s'amoncellent cependant au-dessus de lui. Le 19 décembre dernier, le Comité consultatif sur la sécurité aéros-

NASA

La station spatiale Gateway (au centre, accompagnée de la capsule Orion à droite) servira d'avant-poste lunaire aux astronautes pour leurs explorations sur le sol sélène et leur permettra également de mener des expériences (vue d'artiste).

P. IMBERT / COLLÈGE DE FRANCE

QUESTIONS À

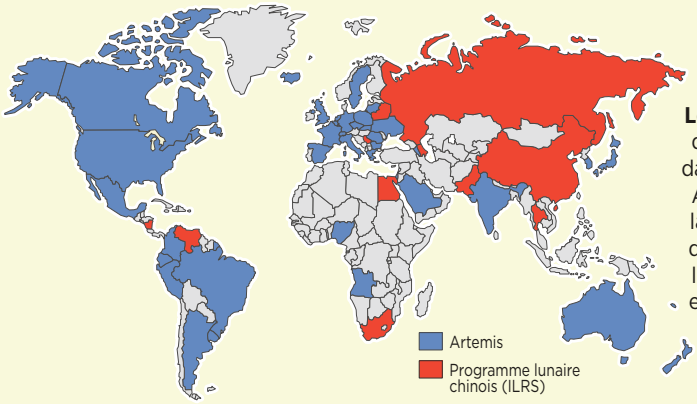
Alban Guyomarc'h Chercheur en droit spatial au Collège de France

« Des points de friction avec les partenaires des Américains »

Que sont les « accords Artemis » ?
Il s'agit d'une initiative juridique lancée par les États-Unis, en octobre 2020. Ils visent à fédérer les partenaires des Américains autour d'une interprétation commune du droit applicable à l'exploration de la Lune et potentiellement des autres corps célestes. En apparence juridique, cette initiative serait en réalité géopolitique selon certains partenaires. Car au lieu du traditionnel dialogue multilatéral où chacun des États participant est réputé égal à l'ensemble des autres États, on est là sur une distribution en étoile, avec au centre les États-Unis auxquels s'associent des états partenaires — une cinquantaine actuellement.

Quels sont les points de friction de ces accords ?
Il y a deux points particulièrement contentieux. Le premier concerne les « safety zones », (zones de non-interférence ou zones de sécurité) autour des installations lunaires : certains s'interrogent en effet sur leur conformité au principe de non-appropriation du traité de l'espace [1967]. Le second point : il est écrit que l'appropriation de ressources spatiales ne constitue pas une appropriation nationale telle qu'évoquée par le traité de l'espace. Cette interprétation n'est pas nécessairement partagée par l'ensemble de la communauté juridique.

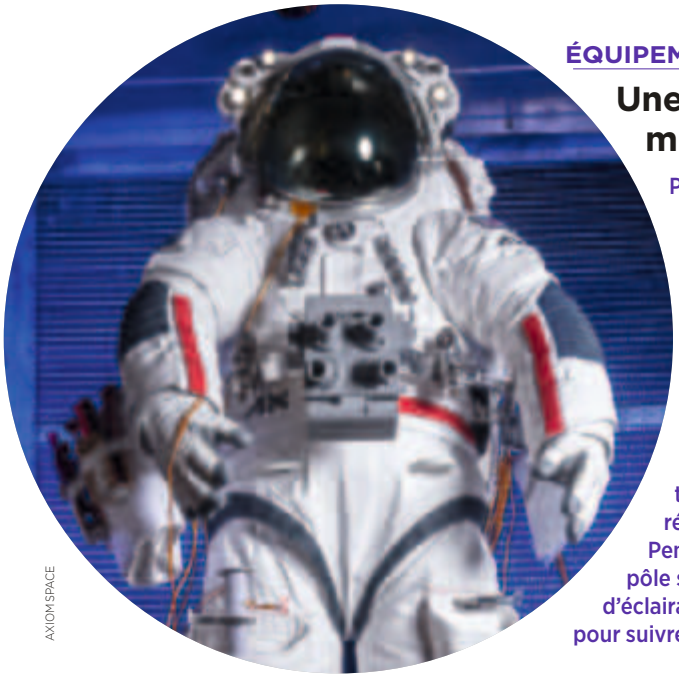
Quel est le rôle des zones de non-interférence ?
Un État peut légitimement revendiquer une zone de sécurité autour de son installation, du fait de sa fragilité, de son coût, de sa complexité technique ou pour la protéger d'interférences avec d'autres programmes. Pour autant, ces zones posent un problème dès lors que l'on sait que c'est le pôle sud de la Lune qui est visé. Car toutes les positions n'y sont pas équivalentes. Certaines ont une exposition au soleil plus longue, sont plus proches de poches de glace d'eau, d'autres sont plus intéressantes pour l'atterrissage. Pour s'accorder au principe de non-appropriation, il faut respecter une limitation de ces zones dans le temps. ■ **Propos recueillis par S. R.**



Les partenaires des États-Unis dans les accords Artemis face à la concurrence du programme lunaire chinois et de ses alliés.

BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : IFRI

patiale de la Nasa, réuni pour l'élaboration de son rapport annuel, a exprimé ses inquiétudes concernant la troisième mission du programme : selon ces experts, nombre d'*« éléments critiques de la mission présentent encore des risques majeurs »*. Ils recommandent donc de revoir son architecture et celle des missions suivantes. La présidente du comité, Susan Helms, a souligné que l'approche de la Nasa concernant les missions Artemis s'accompagne d'une *« accumulation des risques »*. Dont celui pris par le président des États-Unis Donald Trump en 2019, qui avait voulu avancer l'alunissage de 2025 à 2024. Une échéance politique qui s'est avérée irréaliste, compte tenu des aléas technologiques du programme. Le plus important d'entre eux concerne le vaisseau Starship HLS de SpaceX. Depuis avril 2023, les neuf premiers essais se sont soldés par des échecs répétés et des explosions spectaculaires. Le dixième essai, en août 2025, a marqué cependant un grand tournant puisqu'il a été le premier à remplir tous les objectifs de vol. Le succès s'est confirmé en octobre dernier, avec cette fois un test de manœuvre simulant l'approche pour un rendez-vous orbital, soit une démonstration clé pour les futures rencontres avec Orion. Si les échecs sont utiles pour l'ingénierie itérative de SpaceX,


AXIOM SPACE

ÉQUIPEMENT

Une combinaison conçue pour des missions répétées et prolongées

Pour cette nouvelle ère de l'exploration lunaire, la Nasa a confié à l'entreprise Axiom Space la conception d'une combinaison dénommée Axemu (Axiom extravehicular mobility unit). Loin des scaphandres rigides des années Apollo, prévus pour des sorties de huit heures au plus, l'Axemu offre aux astronautes une mobilité accrue grâce à une combinaison d'articulations souples et rigides, facilitant la marche, l'accroupissement, la manipulation d'outils et autres mouvements complexes. À la différence des scaphandres d'Apollo faits sur mesure, ceux d'Axiom s'adaptent à une large gamme de morphologies. Ils intègrent des systèmes de survie autonomes et une gestion thermique améliorée, ainsi que des matériaux capables de résister à la poussière lunaire, abrasive et électrostatique. Pensée pour des missions répétées et prolongées, notamment au pôle sud lunaire, l'Axemu embarque des caméras, des systèmes d'éclairage intégrés au casque, ainsi que des capteurs biométriques pour suivre les signes vitaux et autres systèmes de communication 4G.

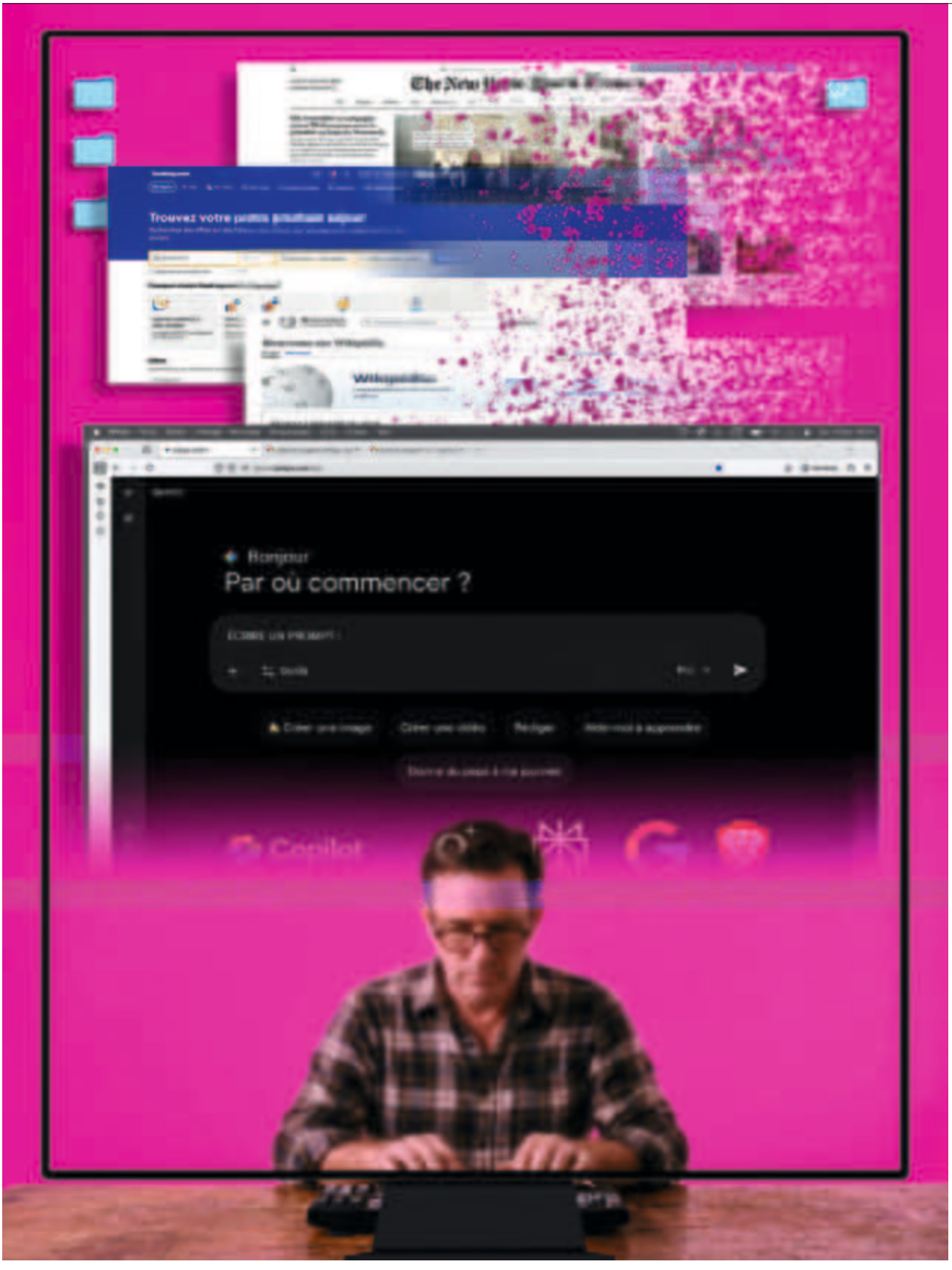
qui consiste à tester rapidement des prototypes et à analyser leur comportement pour les corriger, ils ont conduit à un sérieux retard de planning. En outre, le transfert de carburant cryogénique en orbite, inédit à ce jour, pénalise le Starship auprès des experts.

Le programme lunaire chinois progresse à grands pas

Ce qui a conduit l'agence spatiale américaine à revoir plusieurs fois sa copie. Ainsi, alors qu'en avril 2021 la Nasa avait attribué à SpaceX le contrat exclusif pour l'alunisseur d'Artemis III, au détriment de la société Blue Origin de Jeff Bezos, cette dernière était revenue dans le jeu dès mai 2023, en obtenant le contrat de développement d'un atterrisseur pour Artemis V, notamment grâce à son recours juridique contre la décision initiale de la Nasa. Nouveau coup de théâtre en octobre dernier, lorsque l'administrateur intérimaire de la Nasa Sean Duffy a annoncé ouvrir à nouveau la compétition pour l'atterrisseur lunaire d'Artemis III, rompant ainsi l'exclusivité de SpaceX. Blue Origin était alors explicitement mentionnée comme candidate potentielle. La décision, qui doit être prise dans les prochaines semaines, pourrait reporter à 2029 la date de lancement de la mission habitée.

Or, dans le même temps, le programme lunaire habité chinois progresse à grands pas, comme l'a confirmé son porte-parole Zhang Jingbo lors d'une conférence de presse : plusieurs tests clés pour la mission ayant été menés à bien cette année, l'objectif de faire atterrir un équipage sur la Lune d'ici à 2030 devrait être tenu. *« Il existe un risque réel et croissant que la mission américaine Artemis III ne retourne pas sur la Lune avant que la Chine n'y arrive,* commente sur le réseau X Malcolm Davis, analyste australien des politiques spatiales internationales. *Compte tenu de la complexité et du risque élevé de l'architecture actuelle de la mission, il est temps d'envisager un plan B pour réduire ce risque, soit que les États-Unis perdent cette course — avec des conséquences géopolitiques et sécuritaires catastrophiques — soit que la mission Artemis échoue.* » Avec un test de transport de fret réussi en 2025, l'atterrisseur de Blue Origin — plus léger et moins complexe — pourrait rebattre les cartes. Mais à ce stade, cela pourrait aussi entraîner de nouveaux surcoûts et retards.

Autre difficulté pour le programme Artemis dans son ensemble, et la station Gateway en particulier : l'assurance d'un budget au long cours. Pour l'année fiscale 2026, l'administration Trump a en effet proposé des changements de cap majeurs, comme l'abandon du coûteux lanceur SLS (Space Launch System) et du vaisseau spatial Orion après la mission Artemis III, ou encore la fin du financement de la Lunar Gateway à partir de l'exercice 2026 et l'arrêt progressif de ce programme. Ce revirement s'appuyait sur la conviction que des lanceurs commerciaux coûteraient moins cher à la Nasa, qui pourrait ainsi disposer de plus de moyens pour diversifier ses activités à la surface de la Lune, dont l'établissement d'une base lunaire. Mais le Congrès s'y est opposé : un amendement porté par le sénateur républicain Ted Cruz a alloué 6,7 milliards de dollars au financement de vols supplémentaires pour la fusée SLS et le vaisseau spatial Orion, ainsi qu'à la poursuite de la construction de la station spatiale Lunar Gateway. Le programme Artemis demeure donc sur ses rails. Pour l'instant. ■ **S. R.**



BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

La fin du Web ?

Quand l'IA remodèle Internet

L'intelligence artificielle générative est en train de bouleverser non seulement notre expérience de la navigation sur Internet, mais aussi ses contenus et ses infrastructures techniques. Conséquence : nombre de sites commerciaux ou collaboratifs ont déjà noté une nette chute de trafic. Après l'ère des moteurs de recherche, place à celle des moteurs de réponse.

Par Arnaud Devillard

Figurez-vous un moteur de recherche sur Internet qui ne répondrait plus à une requête par une liste de liens, mais par une réponse rédigée et toute prête, sans que l'internaute ait à cliquer où que ce soit, ni à consulter un site Web. Il n'est plus besoin de l'imaginer : c'est en train d'arriver. Peu après l'apparition de ChatGPT, en novembre 2022, les grands modèles de langage (LLM) ont été utilisés par les internautes comme outils de recherche. Si bien que, très vite, les vrais moteurs de recherche ont intégré ces outils, devenant ainsi des « moteurs de réponse ». Bing de Microsoft, Qwant, DuckDuckGo, Brave proposent désormais une fonction de réponse générée par IA. Google en a même deux (pas encore déployées en France) : l'AI Mode, qui consiste à interroger le moteur en langage naturel sur le mode de la conversation (le « search conversationnel »), et les *overviews*, des pavés de texte placés en tête de l'habituelle liste de liens et résumant les informations correspondant à la requête. Ces derniers sont le produit d'un calcul statistique, sorte de moyenne des réponses les plus probables, sans garantie d'exactitude.

Si cette évolution d'Internet n'est pas la première, elle promet une expérience radicalement diffé-

rente. Même si le changement ne se fera pas du jour au lendemain, il est quasiment acquis, et ce pour une bonne raison : il est bien plus simple pour l'internaute d'interagir en langage naturel. *« Avec l'habitude que l'on a depuis vingt-cinq ans, on ne s'est pas rendu compte que transformer des intentions de recherche en mots-clefs était compliqué pour un cerveau humain »*, estime Olivier Martinez, consultant en intégration de solutions d'IA générative en entreprise. Au risque de fragiliser tout un écosystème reposant sur la mécanique du référencement de sites et de la monétisation du nombre de visites par les publicités (notamment pour les médias en ligne). *« Avec les LLM, les gens restent sur la page du moteur de recherche tandis que les contenus sont utilisés, absorbés et transférés à l'utilisateur,* résume Fabian Suchanek, enseignant-chercheur spécialiste de traitement automatique du langage à Télécom Paris et coauteur d'un article sur ce thème en septembre 2025. *Il n'y a donc plus de revenus de la publicité, plus de dons dans le cas d'un site comme Wikipédia, voire moins de contributions ; les gens qui tiennent des pages Web simplement pour être vus constatent que leur trafic baisse et perdent la motivation à les alimenter. »*

Le véritable intermédiaire entre l'internaute et les contenus n'est plus le navigateur Web ou le moteur de recherche, mais la couche de LLM

Dans une étude parue en avril 2025 et réalisée sur 300 000 mots-clefs, le spécialiste du référencement Ahrefs révélait que la présence des *overviews* de Google faisait chuter de 34,5 % en moyenne le taux de clics sur les liens remontés par la première page de résultats du moteur de recherche. De fait, l'été dernier, nombre de médias américains notaient une nette chute de trafic sur leurs sites : moins 30 % sur celui de CNN, moins 40 % pour le Huffington Post ou Business Insider. En septembre 2025, dans un document adressé aux tribunaux dans le cadre de ses procès pour monopole sur le marché de la publicité en ligne, Google admettait que *« le Web ouvert connaît déjà un déclin rapide »*, et avec lui la publi-

COMPARATIF

L'ère des moteurs de réponse

AI Mode Google	Perplexity Perplexity AI	Bing/Copilot Microsoft	Réponse Flash Qwant	Réponse avec IA Brave Software
Contrairement à l'AI Overview du même Google, cette fonction ne cohabite pas avec une liste de liens. C'est une interface conversationnelle (par écrit ou oral) reposant sur le LLM maison, Gemini. La technologie affiche toutefois des sources et intègre le procédé dit de « query fan-out », qui découpe la requête en plusieurs sous-requêtes. Encore indisponible en France.	Lancé en décembre 2022, Perplexity est le premier moteur de réponse. À chaque question d'internaute, ses robots d'indexation parcourent Internet en temps réel, cherchent les informations pertinentes et en font une synthèse. L'internaute peut voir les « étapes de l'assistant », c'est-à-dire comment le moteur a structuré sa réponse, et avec quelles sources.	Le moteur de Microsoft est le premier, parmi ceux qui existaient déjà, à avoir intégré un LLM — à savoir GPT d'OpenAI — en 2023. Depuis, l'internaute peut choisir entre GPT et Claude, d'Anthropic. La fonction de « search » est désormais intégrée à l'assistant conversationnel Copilot, et le tout peut être associé au navigateur Edge de l'éditeur.	Cette option du moteur français fournit, à la manière des *overviews* de Google, à la fois des réponses générées par IA et une liste de liens. Il suffit de l'activer dans les paramètres. L'internaute peut demander une réponse plus ou moins détaillée et a accès aux sources. Qwant ne communique pas, pour l'heure, sur la technologie de LLM utilisée.	Le navigateur open source Brave est équipé par défaut du moteur maison éponyme depuis 2021. Il a intégré l'assistant conversationnel Leo, lui aussi développé en interne. Il sert à la version IA du moteur, disponible depuis 2025. Les réponses générées s'affichent dans l'écran principal mais on peut faire apparaître toute une série de références dans une fenêtre latérale.
sciav.fr/948aimode	sciav.fr/948perplexity	sciav.fr/948copilot	sciav.fr/948qwant	sciav.fr/948brave

cité dont bénéficient les producteurs de contenus. Au point que les pratiques, jusque-là stratégiques, de SEO (l'optimisation du référencement des sites Web) seraient obsolètes. Bientôt, on essaiera moins de faire remonter des contenus et des sites dans les premiers résultats d'un moteur de recherche que de les faire citer par un LLM (*lire ci-contre*). D'où, déjà, entre autres raisons, la prolifération de contenus en ligne générés et structurés par IA, mieux à même d'être repérés par cette dernière.

Des navigateurs embarquant une IA activée en permanence

La transformation du Web ne s'arrête pas là. Des interfaces telles que Dia, de la start-up new-yorkaise The Browser Company, Comet de Perplexity AI, le mode Copilot dans Edge de Microsoft ou ChatGPT Atlas, apparues en 2025, ne sont rien moins que des navigateurs embarquant une IA activée en permanence. *« On a toujours ce rendu Web auquel on est habitué, mais avec des outils à l'intérieur qui ne sont pas seulement conversationnels mais ont une fonction d'agent »*, poursuit Olivier Martinez. Il est possible de demander à ces IA de trouver une information dans la page ouverte, de faire un résumé, mais aussi d'ouvrir d'autres pages en parallèle, d'y chercher des informations spécifiques dans chacune, de les comparer, etc. Le véritable intermédiaire entre l'internaute et les contenus n'est plus le navigateur Web ou le moteur de recherche, mais la couche de LLM.

Pour en arriver là, d'autres bouleversements sont à l'œuvre, moins visibles par l'utilisateur, au niveau de l'infrastructure technique d'Internet. C'est connu, les géants de l'IA entraînent leurs algorithmes avec une quantité faramineuse de données venant d'Internet. Pour cela, ils utilisent des *webcrawlers*, des logiciels automatisés qui explorent le Web et collectent tout ce qu'ils trouvent. Avec pour conséquence un encombrement de la bande passante, des difficultés d'accès voire des pannes. En avril 2024, l'acti- ▶

255HEX.AI/D.PILLAERT

AVIS D'EXPERT

OLIVIER MARTINEZ

FONDATEUR DE 255HEX.AI ET CONSULTANT

« Avec l'IA générative, la visibilité n'est pas mesurable »

Que recouvre la notion de GEO (Generative engine optimization), appelée à supplanter le SEO (Search engine optimization) ?
Ce sont d'abord des pratiques pour apparaître dans les réponses générées par l'IA, être cité le mieux possible. Et dans un second temps, des instruments mesurant cette visibilité. Comme dans le SEO, en fait.

Qu'est-ce qui diffère, alors ?
Il faut distinguer deux types de modèle. D'abord celui qui ne va pas chercher de réponses hors de son corpus d'apprentissage. Ses réponses ne contiennent en général pas de sources explicites, ou alors il les invente ! Dans ce cadre-là, plus un contenu est présent sur Internet, plus il a de chances d'apparaître. À côté, il y a les modèles ancrés dans le monde réel, ce que l'on appelle le « grounding ». L'outil fait une recherche dans un ou des moteurs à la place de l'internaute, indexe le résultat et génère une réponse. Ces réponses sont sourcées, avec des liens, des références. *A priori*, un site déjà bien référencé aura une bonne visibilité dans la recherche conversationnelle. Disons que cela se vérifie… plus ou moins !

Comment mesurer sa visibilité quand compter des clics sur un lien n'est plus pertinent ?
En pratique, ce n'est pas mesurable car on ne sait pas ce qu'il se passe à l'intérieur de l'interface conversationnelle. Quand je pose la même question que quelqu'un d'autre à ChatGPT, je n'obtiens pas la même réponse. La forme n'est pas la même, les liens cités ne sont pas toujours les mêmes, ou ils le sont mais pas dans le même ordre, les mêmes sources peuvent être présentées de manière positive, négative, neutre…
En outre, il faut faire des *prompts* (requêtes) pour avoir des résultats. Or, personne ne sait ce que tapent exactement les utilisateurs. Il existe des outils qui envoient des centaines de prompts pour voir ce que cela génère. Mais cela ne donne que des tendances globales, une moyenne. Le marché du Web est habitué à savoir s'il y a eu clic ou pas clic sur un lien. Mais avec l'intelligence artificielle générative, on mesure un pourcentage de « peut-être que vous êtes présent dans tel type de contexte, avec tel type de prompt ». ■

Propos recueillis par A. D.

PRODUCTIONS AUTOMATISÉES

Le « slop » ou la dégradation des contenus

La formule « AI slop » (déchets, bouillie, rebuts de l'IA) désigne des contenus générés médiocres, sans intérêt voire trompeurs. Ils prolifèrent sur Internet, en particulier sur les réseaux sociaux : texte, musique, voix, photos, vidéos. Le « slop » découle d'une stratégie de création de contenus rapide, massive et à moindre coût afin de capter et, surtout, monétiser l'attention de l'internaute. La littérature scientifique n'est pas épargnée, submergée d'articles mal conçus aux résultats douteux, comme l'exposent des chercheurs britanniques dans un article paru dans *Plos Biology* en mai 2025.

vité de ClaudeBot, le *webcrawler* d'Anthropic, a rendu inaccessibles quelques heures les forums dédiés au système d'exploitation open source Linux Mint. Quatre mois plus tard, le P-DG du site collaboratif iFixit, destiné à la réparation de matériels électroniques, dévoilait que le même bot s'était connecté à ses serveurs un million de fois en 24 heures.

Les encyclopédies participatives Wikipédia et WikimediaCommons sont des cibles de choix pour les LLM. Or, depuis janvier 2024, la fondation Wikimédia, qui chapeaute ces projets, constate une hausse de 50 % de sa bande passante réservée au téléchargement de contenus multimédias. *« Notre infrastructure est conçue pour supporter des pics soudains d'affluence venant des humains, mais le volume de trafic généré par les* webcrawlers *est sans précédent,* explique Vidhu Goyal, porte-parole de la fondation. *La lecture et l'édition sur nos sites peuvent être ralenties. Notre équipe technique est confrontée à des coupures constantes et doit bloquer l'énormité du trafic venant de ces logiciels avant qu'ils ne perturbent la consultation des sites, entre autres.* »

Une indexation abusive des données du Web par les robots

Ces efforts ont un coût technique et financier, d'autant que la fondation Wikimédia dispose de sa propre infrastructure informatique, gage de son indépendance. Ce qui attire encore plus les bots. *« Nous avons observé de la collecte de données non seulement depuis nos projets Wikimédia, mais aussi sur les systèmes de notre infrastructure développeur, comme nos plateformes de revue de code ou de suivi de bugs »*, ajoute Vidhu Goyal. Tout site Internet peut indiquer aux *webcrawlers*, dans un fichier appelé robots.txt, ce qu'il leur est possible de faire, quelles pages leur sont interdites, la fréquence de visites, le volume limite de données à collecter, etc., y compris en ciblant nommément tel ou tel bot. Mais il n'est pas rare que les logiciels de l'IA passent outre.

Dans ce contexte tendu, le prestataire Cloudflare, qui fournit des services techniques à près de 20 % des sites Internet, a pris une initiative audacieuse avec son service AI Labyrinth, lancé en mars 2025. Concrètement, il s'agit de fausses pages Web générées par IA mais inintéressantes sur lesquelles les bots gaspillent du temps et de la puissance de calcul, tout en épargnant les vrais sites (elles restent invisibles des internautes).

« Tout le contenu de ces pages est vrai mais il ne leur est pas propre, détaille Reid Tatoris, chef de produit senior chez Cloudflare. *Nous pourrions, par exemple, créer beaucoup de textes sur l'histoire de l'astronomie, et les robots d'indexation viendraient les parcourir, mais l'information ne leur serait pas utile car il s'agit de connaissances communes.* » Or, les modèles de langage ont sans cesse besoin de nouvelles données pour s'améliorer, les informations de base ayant depuis longtemps été apprises par les algorithmes. AI Labyrinth évite toutefois de mettre en ligne du pur charabia ou des erreurs susceptibles non seulement de nuire aux performances des LLM, mais aussi d'être rediffusés par ces mêmes LLM.

Ce sont les *webcrawlers* jugés abusifs et illégitimes qui sont en ligne de mire. *« Par exemple, je pourrais développer mon propre modèle, doté d'un* crawler *appelé Reidbot, qui se déclarerait comme tel et suivrait les instructions des sites. Mais je pourrais avoir un* crawler *secret qui n'en respecte aucune : ce serait un robot illégitime »*, poursuit Reid Tatoris. Perplexity AI a plusieurs fois été épinglé pour cette pratique. Dans un monde qui change, difficile de s'adapter aux nouvelles règles quand certains ne les suivent déjà pas. ■

◄ En réponse à la question « Qui a inventé le Web ? », l'IA du moteur Perplexity fournit l'information la plus pertinente (ici trouvée sur Wikipédia) sans renvoyer sur le site de l'encyclopédie en ligne.

CLAUDIA MARCELLONI - MAXIMILIEN BRICE/CERN - CERN

Au Cern, le stockage des données scientifiques se fait sur des milliers de cartouches de bande magnétique gérées par un robot. Ci-dessous, une bande souvenir contenant 30 min d'enregistrement du Grand collisionneur de hadrons (LHC) en 2012 est vendue sur place.

La revanche de la bande magnétique

Sobre en énergie, compacte, durable, la bande magnétique s'impose comme l'un des piliers du stockage massif de données, générées notamment par les grands instruments scientifiques. Une intense activité de recherche repousse encore les limites physiques de ce support vieux de soixante ans.

Lorsqu'ils passent par la boutique « souvenirs » du LHC, le Grand collisionneur de particules du Cern à la frontière franco-suisse, près de Genève, les visiteurs peuvent repartir avec un objet pour le moins singulier : une cartouche contenant une bande magnétique. Chacune renferme 30 minutes de données saisies par les détecteurs lors de 600 000 collisions proton-proton survenues en 2012, l'année de la découverte du boson de Higgs. Un cadeau délicieusement vintage ? Pas du tout. Si la bande magnétique a déserté nos chaînes Hi-Fi depuis longtemps, elle opère aujourd'hui un retour en fanfare dans le stockage des données. À tel point qu'elle est devenue tout simplement indispensable dans bien des secteurs.

Les objets connectés, les vidéos (dont celles, fameuses, de chats !), les photos, le contenu des réseaux sociaux, les messages que l'on s'envoie, les données bancaires, patrimoniales, juridiques… Prises toutes ensemble, ces différentes sources génèrent 29 000 gigaoctets de données chaque seconde, selon les estimations de la plateforme en ligne Planetoscope. Et selon l'institut International data corporation, environ 1,6 zettaoctet (10^{21} octets, *voir le tableau p. 48*) de données était stocké sur bande magnétique en 2024, soit 20 % du total mondial conservé. Et ce n'est qu'un début. Ce volume devrait doubler d'ici à 2027…

« Si les sources sont nombreuses, c'est la

recherche au sens large qui tire vraiment le marché, et de très loin », explique André Marinier, expert du stockage chez IBM. En effet, reprenons l'exemple du LHC. Le centre de données du Cern stocke chaque année plus de 30 pétaoctets de données provenant des expériences menées dans le collisionneur, soit l'équivalent de 1,2 million de disques Blu-ray. Dans un autre domaine comme l'astronomie, l'augmentation de la précision des instruments se traduit naturellement par plus de données récoltées. L'observatoire Vera-Rubin, au Chili, qui a produit sa première lumière en juin 2025, est doté de la plus grande caméra numérique jamais construite pour l'astronomie (3,2 gigapixels). Le télescope produit ainsi de l'ordre de 20 téraoctets de données par nuit d'observation, l'équivalent de 4000 films Blu-ray…

« On ne peut pas se permettre de stocker ces volumes de données sur disque dur, constate André Marinier. *L'équation ne marche pas : entre la taille des disques, leur consommation électrique et la croissance des données, ça coince.* » D'où la « renaissance » du stockage magnétique, qui n'en est pas vraiment une d'ailleurs. Elle avait certes connu un trou d'air il y a une dizaine d'années, *« mais la bande magnétique n'a jamais disparu. Elle a simplement été enterrée prématurément par ceux qui n'avaient pas cette technologie* », selon l'expert d'IBM.

OVH

« Une bande est par définition hors ligne, ce qui en fait un rempart particulièrement efficace face aux cyberattaques »
Grégory Lebourg, directeur environnement chez OVHcloud

Sobriété énergétique, grande capacité et longue durée

Si la bande magnétique est toujours en vogue, alors qu'elle remonte aux années 1960 (le principe d'enregistrer du son sur une bande magnétique date même de 1928), c'est qu'elle a tout pour plaire à notre époque. Le premier argument mis en avant est sa sobriété énergétique : une fois écrites, les cartouches peuvent être stockées sans consommer d'électricité, contrairement aux disques durs qui doivent rester alimentés en permanence. Un atout décisif à l'heure où la facture d'électricité des centres de données explose. André Marinier cite ainsi le cas d'un client disposant de 10 pétaoctets de données, pour lequel une architecture intégrant la bande magnétique a permis de réduire de 97 % la consommation énergétique du stockage par rapport à une solution « tout disque ». À cela s'ajoute une densité physique difficile à égaler. *« Un exaoctet de données peut tenir sur une surface de 325 m²,* précise Grégory Lebourg, directeur environnement chez OVHcloud, numéro un des services d'hébergement et de données en Europe. *Atteindre une capacité équivalente avec des disques durs nécessiterait dix à 20 fois plus de surface, sans même compter les besoins supplémentaires en alimentation électrique et en refroidissement.* » Enfin, là où le stockage sur des disques affiche des cycles de vie de l'ordre de huit ans, les stockages sur bande sont conçus pour durer environ quinze ans.

Il reste que l'on peut être étonné de telles performances pour un moyen de stockage vieux de soixante ans. Mais loin d'être figée, la bande magnétique fait aujourd'hui l'objet d'une recherche active, visant à repousser sans cesse ses limites physiques. Le secteur se concentre aujourd'hui autour de deux acteurs majeurs : IBM, qui conçoit les lecteurs et l'architecture complète des systèmes — des bibliothèques robotisées aux logiciels qui orchestrent le stockage —, et Fujifilm, le principal fabricant mondial de bandes.

MÉTROLOGIE

Des quantités de données toujours plus grandes

Unité	Symbole	Puissance de 10	Ordre de grandeur
Octet	o	10^0	Lettre
Kilo-octet	Ko	10^3	Page de texte
Mégaoctet	Mo	10^6	Photo HD
Gigaoctet	Go	10^9	Film HD court
Téraoctet	To	10^{12}	Disque dur personnel
Pétaoctet	Po	10^{15}	Le LHC stocke 30 Po de données par an
Exaoctet	Eo	10^{18}	68 Eo de données échangées sur Internet (2024)
Zettaoctet	Zo	10^{21}	149 Zo de données numériques mondiales créées en 2024
Yottaoctet	Yo	10^{24}	L'avenir…

PHOTO12/ALAMY

Une cartouche de bande magnétique peut actuellement stocker plusieurs dizaines de téraoctets, avec un potentiel d'augmentation considérable.

Mark Lantz est responsable du groupe de recherche sur les bandes magnétiques au sein du laboratoire IBM Research Europe de Zurich (Suisse). Avec son équipe, il travaille à augmenter la densité de stockage des bandes tout en garantissant la fiabilité des données sur le long terme. *« Même si le disque dur et la bande utilisent les mêmes principes de base de l'enregistrement magnétique, la bande dispose encore d'un énorme potentiel de montée en capacité, davantage que les disques »*, explique le chercheur. C'est précisément cette marge de progression qui guide les travaux de son équipe.

Une montée en capacité sans sacrifier la fiabilité

Sur une bande magnétique, l'information est numérique : chaque donnée est codée sous forme d'une suite de bits, des 0 et des 1. Mais ces bits ne correspondent ni à des trous, ni à des marques visibles. Ils sont stockés sous la forme de minuscules orientations magnétiques au sein de la couche d'enregistrement de la bande. Pour stocker plus d'informations, les chercheurs réduisent donc la taille des particules qui portent les bits d'informations. Mais celles-ci ne peuvent pas être miniaturisées indéfiniment : trop petites, elles deviennent instables et risquent de perdre l'information. L'enjeu consiste donc à réduire leur taille tout en garantissant une stabilité sur plusieurs décennies, ce qui a conduit à l'adoption de nouveaux matériaux, comme les ferrites de baryum ou de strontium.

Alors que les cartouches utilisées aujourd'hui dans les systèmes industriels stockent plusieurs dizaines de téraoctets, les laboratoires d'IBM explorent ainsi des capacités bien supérieures. *« Notre dernière démonstration de densité surfacique a permis d'enregistrer à 317 gigabits par pouce carré, soit près de 30 fois plus que nos cartouches actuelles,* se félicite Mark Lantz. *À cette densité, une seule cartouche pourrait contenir environ 580 téraoctets, soit plus d'un demi-pétaoctet, tenant littéralement dans la paume de la main.* » Là où il faudrait environ 20 à 25 disques durs de très grande capacité.

Les progrès tiennent aussi à la structure de la bande et aux systèmes de lecture. Des couches magnétiques toujours plus fines et régulières permettent de rapprocher la tête de lecture et d'améliorer la qualité du signal. Les lecteurs écrivent et lisent un nombre croissant de pistes en parallèle, tandis que l'électronique et les algorithmes de correction d'erreurs compensent un signal qui serait moins clair. *« Nous avançons par améliorations successives sur tous les éléments du système »*, conclut Mark Lantz. C'est cette accumulation de progrès, plutôt qu'une rupture unique, qui permet à la bande magnétique de continuer à gagner en capacité sans sacrifier sa fiabilité.

Recommandée pour l'archivage des données sensibles

Enfin, la bande magnétique possède atout non négligeable : la sécurité. *« Une bande qui n'est pas dans un lecteur est, par définition, hors ligne,* souligne Grégory Lebourg. *Cet isolement, impossible à obtenir avec des systèmes de stockage connectés en permanence, fait de la bande un rempart particulièrement efficace face aux cyberattaques.* » C'est d'ailleurs l'une des raisons pour lesquelles elle est privilégiée pour l'archivage de données sensibles ou critiques.

Mais cette faculté de conserver hors d'atteinte des données pendant des années ouvre aussi des perspectives plus inattendues. Certains experts redoutent en effet que des données chiffrées aujourd'hui indéchiffrables soient volées et stockées sur bande dans l'attente de progrès futurs. Avec l'avènement attendu des ordinateurs quantiques, capables de fragiliser les algorithmes cryptographiques actuels, des informations conservées pendant des décennies pourraient devenir lisibles *a posteriori*.

Conscient de ce risque, IBM affirme avoir anticipé cette menace en intégrant dès aujourd'hui des mécanismes de chiffrement conçus pour résister aux attaques quantiques. *« Il n'y a pas encore une grosse adoption de la part des clients. Cela reste, pour beaucoup, des sujets un peu science-fiction »*, confie l'entreprise. En attendant, qui aurait cru qu'après soixante ans de carrière, la bande magnétique se retrouverait aux frontières de la science-fiction ? ■

Fabrice Nicot

Un scénario crédible pourrait expliquer l'étoile de Bethléem

Dans la Bible, cet astre se déplace dans le ciel avant de s'immobiliser au-dessus de l'endroit où Jésus serait né. Un phénomène céleste très intrigant mais qui n'a rien d'impossible, démontre un astronome à l'appui de simulations et de documents historiques.

Dans le deuxième chapitre de l'Évangile selon Matthieu, il est écrit : « *Jésus était né à Bethléem en Judée, au temps du roi Hérode le Grand. Or, voici que des mages venus d'Orient arrivèrent à Jérusalem et demandèrent : "Où est le roi des Juifs qui vient de naître ? Nous avons vu son étoile à l'orient et nous sommes venus nous prosterner devant lui." […] Alors Hérode convoqua les mages en secret pour leur faire préciser à quelle date l'étoile était apparue […] Après avoir entendu le roi, ils partirent. Et voici que l'étoile qu'ils avaient vue à l'orient les précédait, jusqu'à ce qu'elle vienne s'arrêter au-dessus de l'endroit où se trouvait l'enfant.* »

Tel est le signe divin, selon la tradition chrétienne, qui aurait annoncé la naissance de Jésus et guidé des mages orientaux jusqu'à Jérusalem puis jusqu'à Bethléem, où le Christ serait né : une étoile symbole de guidance et d'espoir qui, pendant la fête de Noël, orne les crèches et sapins. Ce phénomène céleste doit-il être considéré comme relevant du mythe religieux, de l'allégorie… ou a-t-il pu réellement exister ? Dans ce dernier cas, quelle pourrait être l'origine astronomique de la fameuse étoile de la Nativité ? Dans la revue *Journal of the British Astronomical Association*, le planétologue Mark Matney de la Nasa démontre qu'une telle apparition est scientifiquement possible. Il détaille même, à l'appui d'archives historiques et de modélisations réalisées par ordinateur, la suite d'événements qui auraient pu se dérouler.

« *Plus de 400 livres et articles ont été publiés sur le sujet par des scientifiques, historiens ou théologiens* », rappelle d'abord le chercheur. La première difficulté concerne les sources littéraires. L'Évangile selon Matthieu est en effet le seul texte biblique canonique — et la plus ancienne occurrence — décrivant des mages orientaux (ni leur nombre ni leur statut ne sont alors précisés) guidés jusqu'en Judée par un signe céleste pour rendre hommage à l'enfant Jésus. Un texte rédigé, selon les datations actuelles, autour des années 80 de notre ère, par un auteur qui n'était probablement pas un témoin direct des événements liés à la Nativité. La difficulté majeure réside toutefois dans le récit lui-même, décrivant un astre apparu à l'est qui « *précédait* » les mages avant de « *s'arrêter* » dans le ciel à un endroit fixe.

De nombreuses hypothèses ont été avancées pour fournir une explication rationnelle : des météores (étoiles filantes) pénétrant dans l'atmosphère terrestre et produisant des traînées lumineuses dans le ciel de Judée ; des explosions d'étoiles (novae ou supernovae) devenant soudainement très brillantes au moment où Jésus serait né ; la comète de Halley, qui revient tous les 75 ans environ à proximité du Soleil, avec un passage documenté en l'an 12 avant notre ère ; ou encore des conjonctions de planètes, telles Jupiter et Saturne qui, en l'an 7 avant notre ère, se rapprochèrent jusqu'à donner l'illusion de n'être qu'une seule étoile à la fois très brillante et intrigante — peut-être l'astre de la Nativité, sup-

NASA

« Plus de 400 livres et articles ont été publiés sur le sujet par des scientifiques, historiens ou théologiens »

Mark Matney, planétologue à la Nasa

GETTY IMAGES

L'astre qui, d'après l'Évangile selon Matthieu rédigé en l'an 80 de notre ère, aurait guidé des mages depuis l'Orient vers la Judée, pourrait être une comète passée tout près de la Terre et visible à l'œil nu.

posait l'astronome allemand Johannes Kepler au début du XVII^e siècle.

« Presque tous les objets astronomiques ont été proposés à un moment ou un autre pour expliquer l'étoile de Bethléem », constate Mark Matney. Mais le caractère d'abord mouvant puis fixe de cet astre est extrêmement étrange et *« ne semble correspondre à aucun objet céleste naturel connu »*, poursuit-il. Il existe toutefois certaines configurations très particulières où un objet céleste pourrait bel et bien correspondre au récit évangélique, a découvert le planétologue.

L'astre en question serait ainsi une comète, un corps constitué de roche et de glace venu des régions les plus éloignées du Système solaire. Elle posséderait une orbite très excentrique et serait passée surtout très près de notre planète — à quelque 400 000 kilomètres, soit la distance environ entre la Terre et la Lune. Une telle comète aurait été très brillante, visible même en plein jour à l'œil nu. Or, les simulations numériques réalisées par Mark Matney indiquent qu'un tel objet aurait eu un mouvement apparent très lent pendant plusieurs semaines. Et si ce mouvement compense celui de la rotation de la Terre pour un observateur donné, l'astre pourra sembler immobile quelques heures durant, *« du fait d'un mouvement géosynchrone temporaire »*, explique le chercheur. Donc un astre qui se déplace dans le ciel puis s'arrête au-dessus d'un endroit fixe !

Une comète observée en Chine en l'an 5 avant notre ère

Or, les registres de la dynastie Han mentionnent l'existence d'une *« étoile balai »* — autrement dit une comète possédant une queue visible — qui aurait pu produire un tel phénomène, soutient Mark Matney. Tout d'abord, la chronologie concorde. Car cette comète a été observée par les astronomes chinois en l'an 5 avant notre ère, soit l'année (avec l'an 6 avant notre ère) où la plupart des historiens s'accordent sur la naissance probable de Jésus. Leurs chroniques indiquent par ailleurs qu'elle a été visible pendant plusieurs semaines entre mars et avril, ce qui suggère qu'elle devait être très brillante et très proche de la Terre, avec un mouvement apparent particulièrement lent de surcroît.

Les reconstructions orbitales de Mark Matney indiquent ainsi qu'*« un certain jour de juin, cette comète aurait pu se déplacer de sorte à ce qu'elle passe devant une personne voyageant de Jérusalem à Bethléem, puis s'arrête quasiment au-dessus de sa tête pendant environ deux heures »*, explique-t-il. Ses travaux ne permettent bien sûr pas de prouver que cette comète correspond à l'étoile qu'auraient vue les Rois mages il y a plus de 2000 ans, reconnaît l'astronome. Mais il s'agit bien, souligne-t-il, *« du premier candidat astronomique jamais identifié pour l'étoile de Bethléem dont le mouvement apparent pourrait correspondre à la description de Matthieu. »* ■

Franck Daninos

La route électrique trace sa voie

Un dispositif de recharge dynamique des véhicules électriques a été testé avec succès sur un tronçon d'une autoroute d'Île-de-France. Cette technologie sans contact permettrait de réduire la taille et la puissance des batteries embarquées.

Rouler librement en véhicule électrique sur de très longues distances, sans devoir programmer des pauses pour recharger sa batterie, pourrait devenir réalité. Pour cela les autoroutes, voire certains grands axes, devront se doter d'un dispositif dit de recharge dynamique de la batterie des véhicules. C'est ce qui vient d'être expérimenté sur une portion de 1,5 km de l'autoroute A10 au niveau d'Angervilliers (Essonne) avec le système « Charge as you drive ». Ce projet, sur lequel travaillent conjointement Vinci Autoroutes, la start-up israélienne Electreon, Vinci-Construction, l'université Gustave-Eiffel et le groupe Hutchinson, s'inscrit dans une dynamique européenne de développement de « routes électriques » pour libérer la voiture électrique des étapes de recharge pour les longs trajets. Et cela fonctionne : quatre prototypes de véhicules représentatifs du parc automobile, un poids lourd, un utilitaire, un bus et une voiture, ont roulé librement sur ce tronçon tout en rechargeant leur batterie. Une prouesse technologique en l'absence de tout contact physique entre le véhicule et la source d'alimentation électrique.

Le système repose sur un dispositif de transfert d'énergie par couplage magnétique. Ce procédé est comparable à celui qu'exploitent les smartphones pour recharger leur batterie sans contact. Il est assimilable à un transformateur électrique dont les bobinages, dits primaires et secondaires, au lieu d'être solidaires, sont séparés. Mais si quelques watts suffisent pour la recharge d'un téléphone, ce sont 300 kilowatts qui sont mis en jeu lorsqu'il est question de recharger les batteries d'un camion ! Alimenter en électricité un tel dispositif demandera le déploiement de nouveaux réseaux.

VINCI AUTOROUTES - C. GASCH

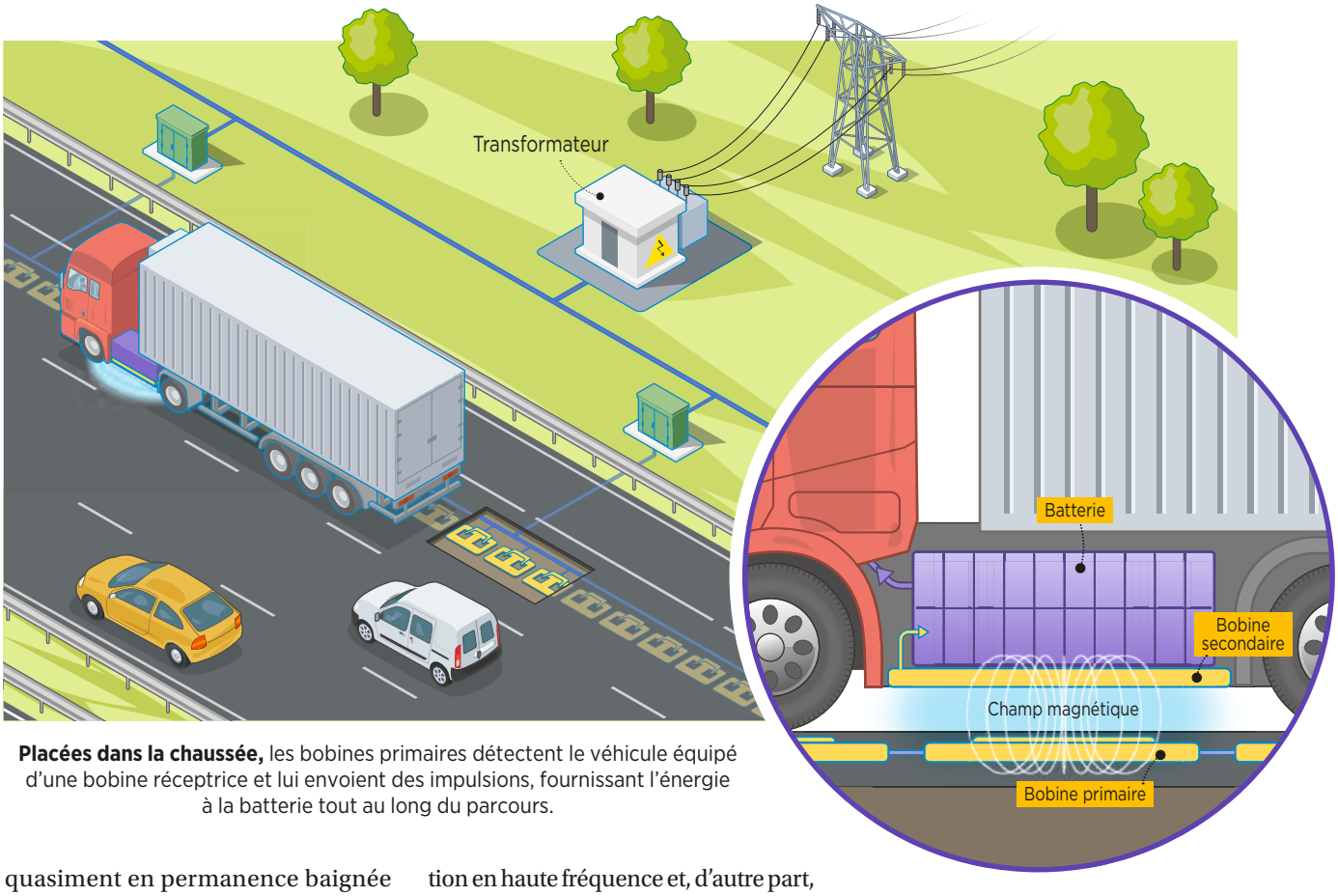
900 bobines à induction ont été installées sous le revêtement de l'A10 pour cette expérimentation.

Pour les besoins de cette première expérimentation, une sous-station d'alimentation électrique conventionnelle a suffi. Elle se résume à un transformateur comparable à celui chargé d'alimenter une zone d'habitation résidentielle ou un petit site industriel. Mais pour approvisionner une section entière d'autoroute, le réseau de distribution électrique devra sans doute se doter d'une infrastructure comparable à celle mise en œuvre sur les réseaux TGV. Sollicités, ni EDF, ni RTE, ni Enedis n'ont pu nous renseigner sur les solutions envisagées.

Les véhicules sont baignés dans un flux magnétique permanent

La difficulté est que le transfert d'énergie par couplage magnétique décroît très rapidement dès que la distance augmente entre le bobinage « émetteur » et le bobinage « récepteur ». Quelques dizaines de centimètres suffisent pour compromettre le fonctionnement du dispositif. Or, les véhicules doivent disposer d'une garde au sol suffisante pour circuler sur n'importe quelle route. De plus, ils ne restent que très peu de temps en vis-à-vis de la bobine émettrice.

C'est pourquoi les bobines mises en œuvre sont à l'image des puissances à transférer : imposantes. Logées sous 10 cm de bitume, de forme carrée, elles mesurent un mètre de côté et sont regroupées par paire dans un boîtier de protection. Sur l'expérimentation de l'autoroute A10, ce ne sont pas moins de 900 bobines qui ont pris place sous le revêtement de l'autoroute. Ainsi, la bobine réceptrice du véhicule se trouve



BRUNO BOURGEOIS

Placées dans la chaussée, les bobines primaires détectent le véhicule équipé d'une bobine réceptrice et lui envoient des impulsions, fournissant l'énergie à la batterie tout au long du parcours.

quasiment en permanence baignée dans le flux magnétique que génèrent les bobines de la chaussée.

Pour gagner en rendement tout en limitant le nombre de spires des bobines, et donc la quantité de cuivre mise en œuvre pour leur confection, le système travaille en haute fréquence (86,5 kilohertz, contre 50 hertz pour le réseau domestique). Une sous-station prend en charge la génération de ce courant haute fréquence.

Enfin, le système identifie chaque véhicule qui passe au-dessus d'une bobine pour, d'une part, activer son alimentation en haute fréquence et, d'autre part, facturer la quantité d'électricité transférée. Cette identification se fait avec un système RFID (Radio frequency identification) comparable à celui des badges de télépéage. Ce qui ne manquera pas de susciter des inquiétudes pour la protection de la vie privée. En effet, rien de plus simple que de déduire la vitesse du véhicule par mesure du temps de passage au-dessus des bobines ou de le localiser au mètre près.

Si la faisabilité d'une solution de recharge en roulant est prouvée, reste la question de son coût. Selon Pierre Delaigue, directeur des projets de mobilité autonome chez Vinci, le surcoût de son intégration à de nouveaux tronçons d'autoroute serait de l'ordre de 4 millions d'euros par kilomètre, en équipant une voie dans chaque sens de circulation. La mise en place des bobines peut aussi être effectuée lors de travaux de réfection de la chaussée. Une opération dont le coût s'élève en moyenne 8 millions d'euros environ pour une autoroute de deux fois deux voies, avec un surcoût d'environ 50 %. Mais il pourrait être en partie contrebalancé par une baisse de prix du véhicule. La recharge dynamique permettrait en effet de réduire considérablement la taille des batteries des voitures puisqu'une autonomie d'une cinquantaine de kilomètres deviendrait suffisante. De quoi diviser par dix le coût de la batterie, qui est aujourd'hui estimé entre 10 000 et 35 000 euros. ■ **Henri-Pierre Penel**

Une puce RFID identifie chaque véhicule qui passe au-dessus d'une bobine pour activer son alimentation et facturer la quantité d'électricité transférée

MARC CHESNEAU/NATURAGENCY

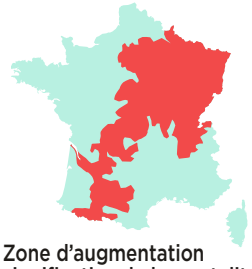
Depuis 2018, les scolytes typographes s'attaquent aux épicéas affaiblis par des sécheresses à répétition dans le nord-est de la France. L'insecte creuse des galeries sous l'écorce des résineux, entraînant leur mort en quelques semaines.

Face aux maladies, la forêt doit se réinventer

La forêt française souffre d'une invasion sans précédent d'insectes et de champignons ravageurs. Dans les Landes comme dans les Vosges, c'est la survie même de massifs entiers qui est en jeu. Mais des solutions existent : pièges chimiques, lâchage de parasites, importations d'essences résistantes ou arrêt de la monoculture. Exemples avec six espèces d'arbres menacées.

Par Loïc Chauveau - Illustrations : Julie Terrazzoni pour Sciences et Avenir

C'est un vrai paradoxe : la forêt française s'étend, mais elle est malade. Depuis le début du XX^{e} siècle, les arbres annexent les terres délaissées par l'agriculture. Ils s'étendent aujourd'hui sur 17,6 millions d'hectares, selon l'inventaire forestier national (IFN). C'est 900 000 hectares de plus qu'il y a dix ans. Mais au cours de la même période, leur mortalité a plus que doublé. En moyenne, entre 2015 et 2023, les maladies (70 insectes ravageurs et 110 champignons pathogènes recensés), les sécheresses, les tempêtes, les incendies ont détruit 16,7 millions de m^3 de bois qui aurait dû rester vivant plus longtemps. C'est une hausse de 125 % par rapport à la décennie 2005-2015. Au total, nous apprend l'IFN, la France compte 159 millions de m^3 de bois mort sur pied. 5 % des 2289 millions d'arbres que nous croisons en forêts françaises ont en fait trépassé. S'y ajoutent 8 % des arbres dégradés ou en cours de dépérissement, soit près de 200 millions d'individus. De plus, l'Office national des forêts (ONF) estime que la moitié de la forêt française va basculer dans des conditions météo inadaptées à ses besoins d'ici à 2100. Le réseau Aforce (Adaptation des forêts au changement climatique), géré par le Centre national de la propriété forestière (CNPF), étudie ainsi, sur plusieurs centaines de placettes dans toutes les régions françaises, près de 150 espèces qui vont s'adapter au climat futur. Mélèze de Sibérie, épicéa d'orient, chêne du Caucase, liquidambar, cèdre du Liban peupleront bientôt la forêt française. ■



Zone d'augmentation significative de la mortalité des arbres (2005-2023).

BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : IFN

DOUBLE PEINE POUR LE CHÂTAIGNIER

Originaire d'Asie, le chancre du châtaignier *Cryphonectria parasitica* est apparu en 1904 aux États-Unis par l'importation de châtaigniers japonais. En 50 ans, ce champignon a fait disparaître du paysage l'espèce américaine *Castanea dentata*. Il est arrivé en France en 1956, toujours par échange commercial, et a affaibli les populations locales de *Castanea sativa* dans toute l'Europe. Cet ascomycète se multiplie sous des formes sexuées mais aussi asexuées qui favorisent sa dispersion rapide par le vent. Son mycélium s'insinue dans les vaisseaux puis le bois de l'arbre, provoquant des nécroses d'une couleur rouge ou orange qui peuvent provoquer la mort des gros arbres. Les forestiers et castanéiculteurs n'ont pu que constater les dégâts jusqu'à ce qu'un virus parasite — lui aussi asiatique — du champignon se montre efficace pour stopper les nécroses sans toutefois les faire disparaître.

Mais le châtaignier doit désormais aussi faire face à un insecte, le cynips *Dryocosmus kuriphilus*, apparu en France en 2007 en provenance de Chine. Cet hyménoptère de 2,5 à 3 millimètres de long provoque des galles qui contractent la surface des feuilles et perturbent floraison et fructification. Il a fait baisser la production française de châtaignes de 50 à 70 %, ce qui explique le prix désormais élevé de ce fruit. Là encore, un parasite importé de Chine permet de limiter les dégâts. Les guêpes *Torymus sinensis* infectent les œufs et les larves du cynips avec de bons résultats. Des variétés hybrides créées aux États-Unis issues de croisements entre châtaigniers américains et chinois présentent une bonne résistance au chancre et sont proposées par les pépiniéristes. C'est à ce jour la seule solution pour maintenir la castanéiculture en vie. ■

LA PYRALE DU BUIS, UN ENNEMI DIFFICILE À COMBATTRE

Arrivée d'Asie en 2008, la pyrale du buis *Cydalima perspectalis* est aujourd'hui présente sur la quasi-totalité du territoire français. Cet insecte ne s'attaque qu'au buis. Sa chenille à la tête noire et au corps vert clair se nourrit des feuilles de cet arbuste au point de le défolier entièrement. Son papillon blanc lustré de 5 centimètres environ émerge en mai. Si ses ravages sont très visibles dans les parcs et jardins ornementaux, ils sont encore plus redoutables dans les forêts. Ces arbustes des sous-bois jouent en effet un rôle important contre l'érosion des sols. Desséchés par la défoliation, ils deviennent des combustibles accélérant la force des incendies. Dans les forêts du Jura, on estime que 80 % des buis sont morts.

La lutte contre un insecte qui n'a pas de prédateur n'est pas simple. Le projet SaveBuxus teste ainsi différents moyens de lutte comme le piégeage de masse, le traitement microbiologique, le lâcher de parasites, l'installation de nichoirs à mésanges. Les gestionnaires de parcs utilisent des produits phytopharmaceutiques à base de bactéries *Bacillus thuringiensis*. Des piégeages par phéromones sont également utilisés, et même la récolte à la main des chenilles. Mais en forêt, rien n'est vraiment possible, si bien que, dans le Jura, les traditionnelles « tourneries » du buis fabriquant jouets, ustensiles de cuisine, cochonnets de pétanque sont obligées de changer d'essence, tandis que dans les forêts, le buis laisse la place aux ronces. ■

LES PINS MARITIMES DE LA FORÊT LANDAISE MENACÉS PAR LE NÉMATODE

Le 3 novembre 2025 est une triste date pour la forêt landaise. Ce jour-là ont été repérés pour la première fois des nématodes dans des pins maritimes de la commune de Seignosse (Landes). *Bursaphelenchus xylophilus* est un ver originaire d'Amérique du Nord. Il est apparu en Europe pour la première fois en 1988, au Portugal. Spécialisé dans le pin maritime, le nématode pénètre par millions dans les canaux vasculaires, s'y multiplie, bloque la circulation de la sève et provoque une multitude d'embolies. En quelques semaines, les aiguilles du pin rougissent, puis tombent, l'arbre dépérit littéralement sur pied. Ce sont ainsi les 818 000 hectares de sylviculture aquitaine qui sont menacés car le ver se déplace facilement grâce à un coléoptère vecteur, *Monochamus galloprovincialis*. Tous les pins situés dans un rayon de 500 mètres autour du lieu de découverte vont être abattus d'ici à la fin de l'hiver 2026, et les travaux sylvicoles sont suspendus dans un rayon de 20 kilomètres.

Mais il est fort probable que ce ne sera pas suffisant et la diffusion du nématode est désormais inéluctable. Des projets scientifiques s'intéressent à l'histoire évolutive de l'espèce et tentent de mieux comprendre le fonctionnement démographique du nématode lors de sa phase d'invasion, ce qui devrait permettre à terme d'améliorer les moyens de surveillance et de lutte. Il n'existe pas encore de variétés résistantes ni de prédateurs du ver. Aussi, aujourd'hui, la seule solution viable est de cesser la monoculture du pin pour planter des forêts mélangeant feuillus et résineux. ■

LES SCOLYTES RAVAGENT LES ÉPICÉAS DU NORD-EST

Une « *tempête silencieuse* », déplorent les forestiers du nord-est de la France. Les épicéas y tombent par milliers, vaincus par les scolytes. Cette large famille d'insectes creuse des galeries dans le cambium de l'arbre (la couche sous l'écorce) pour y pondre leurs œufs. L'arbre perd de sa vigueur, ses aiguilles tombent et la mort peut intervenir en quelques semaines. Le principal bourreau des pessières (plantations en monoculture d'épicéas) est un scolyte nommé typographe. L'hécatombe a commencé en 2018, en conséquence d'une succession d'étés chauds. Les insectes rencontrent en effet des conditions favorables à leur reproduction et ils s'attaquent de plus à des arbres affaiblis. Or, les sécheresses de plus en plus longues et les vagues de chaleur frappent des résineux souvent plantés à moins de 800 mètres d'altitude, dans un milieu devenu trop chaud pour eux. Les abattages vont donc se poursuivre, modifiant en profondeur le paysage des régions du nord-est et du Massif central. Il est difficile de lutter contre les scolytes. La première des stratégies est de surveiller les forêts pour couper les arbres malades afin d'éviter les contaminations. L'ONF a également mis en place des « pièges à phéromones » qui capturent les femelles scolytes. Les forestiers ont ainsi une idée plus précise du degré d'infestation des massifs. En Allemagne, des gestionnaires ont parié sur le « laisser-faire ». Sans intervention, les scolytes se développent mais leurs prédateurs aussi, ce qui peut rétablir un équilibre écologique. Le réseau Aforce teste de son côté les possibles remplaçants de notre épicéa commun : épicéas de Serbie, d'Orient, ou de Sitka. ■

APRÈS LA GRAPHIOSE, UNE SECONDE CHANCE POUR L'ORME

La première attaque de *Ophiostoma ulmi* (graphiose de l'orme) a eu lieu en 1916. De nombreux ormes ont su résister à ce champignon. Mais en 1971, la seconde offensive d'un descendant, *Ophiostoma novo-ulmi,* a eu raison des ormes champêtres. Selon les travaux de Jean Pinon, chercheur de l'Inrae (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement), cet ascomycète est apparu dans le Val-de-Marne, en provenance d'Amérique du Nord *via* l'Angleterre grâce au commerce de grumes. Dix ans plus tard, il avait envahi la France. Cette souche s'est avérée bien plus agressive que celle du début du siècle. L'arbre emblématique des haies de l'ouest de la France, mais aussi des forêts tempérées et des alignements des boulevards a ainsi quasiment disparu du paysage. Le mycélium d'*Ophiostoma ulmi* envahit le réseau vasculaire des branches et du tronc. Le feuillage se flétrit, les branches se dessèchent. La mort peut se produire dans les deux ans. Intervient alors une deuxième phase : les scolytes viennent se nourrir du bois mort. Ils deviennent porteurs des spores du champignon, favorisant sa dispersion. Il n'y a toujours pas de remède à la graphiose. Mais des variétés résistantes arrivent sur le marché, issues d'hybridation entre ormes européens et asiatiques opérées par l'Inrae et son homologue néerlandais Alterra. Des municipalités tentent ainsi la réimplantation de l'espèce. Mais ces arbres sont des clones qui ne peuvent être réimplantés en forêt. Le frêne de Mandchourie et le frêne oxyphylle sont des remplaçants probables en cours de test. ■

DES SOLUTIONS ATTENDUES CONTRE LA CHALAROSE DU FRÊNE

Encore un champignon ! *Hymenoscyphus fraxineus* est arrivé d'Asie de l'Est en Pologne dans les années 1990. Au rythme de 60 kilomètres par an, il a peu à peu envahi tout le continent européen, provoquant d'énormes dégâts chez les frênes (*Fraxinus sp*) qui représentent la quatrième essence exploitée par l'industrie du bois. Les spores du champignon voyagent au printemps grâce au vent, se déposent et germent sur les feuilles, provoquant des nécroses qui s'étendent tout l'été. Le champignon passe l'hiver sur les nervures des feuilles mortes, dans la litière au pied des arbres, ce qui explique que les frênes des villes soient épargnés par la maladie puisque le cycle ne peut s'accomplir faute d'humus. Plus les arbres sont jeunes, plus ils sont vulnérables et les plantations monospécifiques sont désormais impossibles. Le champignon se propage plus facilement sur des sols humides et sous des climats arrosés en été. C'est pourquoi les frênes poussant dans le pourtour méditerranéen sont épargnés du fait d'étés de plus en plus secs et de températures élevées. L'exploitation du frêne commun est aujourd'hui très difficile en forêt, mais des espoirs de restauration subsistent. Il existe en effet des frênes naturellement résistants à la maladie. Les forestiers estiment pouvoir faire se multiplier ces individus tolérants. L'arbre ayant un grand intérêt économique, il a fait l'objet de recherches sur sa culture permettant de réduire la pression de la maladie. Les sylviculteurs bénéficient ainsi depuis 2021 d'un ouvrage, *Le Frêne face à la chalarose*, édité par le CNPF. ■

NHK - WIKIPEDIA.CC

Le passereau « Parus minor » serait en mesure de combiner des mots pour transmettre des messages à ses congénères, notamment face à des prédateurs, selon le chercheur Toshitaka Suzuki.

L'homme qui a percé le langage des oiseaux

L'éthologue japonais Toshitaka Suzuki étudie depuis presque vingt ans la mésange de Chine. Il tente de prouver, grâce à des expériences originales, que ce volatile utilise bien une grammaire pour communiquer.

Sous une douce pluie, le calme règne dans le campus de l'université de Tokyo situé en plein cœur de la capitale japonaise, troublé uniquement par le tambourinement des gouttes. Dans un laboratoire niché dans l'un de ses bâtiments historiques, un scientifique parmi les plus en vogue dans l'archipel, Toshitaka Suzuki, étudie depuis presque vingt ans la « langue » de la mésange de Chine (*Parus minor*), une espèce de la famille des paridés endémique en Asie de l'Est. Il soutient que ces oiseaux noir et blanc de la taille du moineau ont développé une grammaire. *« Les mésanges de Chine ont plus de 200 combinaisons de cris et communiquent entre elles en suivant une certaine règle »*, raconte l'éthologue, qui consacre une bonne partie de l'année à Karuizawa, au nord-ouest de Tokyo, à ses études de terrain. Celles-ci, publiées dans des revues scientifiques comme *Nature Communications* et *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, attirent l'attention des éthologues du monde entier. En 2022, il fut le premier scientifique asiatique à donner une conférence plénière au congrès de la Société internationale d'écologie comportementale.

Dans le monde de l'éthologie, sa théorie suscite fascination et débats. Depuis les années 1970, de nombreuses études ont été menées sur les capacités linguistiques des animaux. *« Jusqu'à présent, les "phrases" produites par les animaux étudiés restent relativement courtes et simples »*, indique Sébastien Derégnaucourt, professeur d'éthologie à l'université Paris-Nanterre.

Toshitaka Suzuki est avant tout un passionné, obsédé par les comportements des mésanges de Chine. Sa fascination pour les oiseaux remonte à l'adolescence : *« Ils sont un peu comme nous : bipèdes et*

SUSAN KUKLIN/SPL/SUCRE SALÉ

PROGRAMME

Quand on voulait faire parler les chimpanzés

Confier un bébé chimpanzé à une famille humaine dans le but de vérifier si le primate a la capacité d'acquérir un langage, tel était l'objectif du programme de recherche du psychologue à la Columbia University (États-Unis) Herbert Terrace. Le projet Nim (du nom du primate, *photo*) est l'un des plus célèbres dans le domaine de la communication animale. Lancé en 1973, il fut abandonné quatre ans plus tard sans que Herbert Terrace parvienne à réaliser son but. Nim semblait avoir réussi à apprendre une centaine de mots en langage de signes et même des séquences de mots, mais il s'était avéré que c'était parce que ses professeurs l'incitaient inconsciemment à faire le bon geste une fraction de seconde avant lui. Par ailleurs, après avoir connu plusieurs changements de mères « adoptives » humaines, Nim commençait à montrer une certaine agressivité.

percevant le monde grâce à la vision et à l'ouïe », raconte-t-il. Lycéen, il s'adonne donc à corps perdu à l'observation ornithologique. Étudiant, il part jumelles à la main dans un refuge à Karuizawa. La mésange de Chine, qui émet des sons *« particulièrement variés »*, attire son attention. *« Très vite, j'ai compris que les cris correspondaient à des objets ou à des gestes spécifiques,* explique-t-il. *Par exemple, le son "jijjiji" qu'émettent les mésanges de Chine quand elles ont trouvé quelque chose à manger, sert à regrouper les individus de leur groupe dans un même endroit. Quand elles font "pîtspi", c'est pour mettre les autres oiseaux en état d'alerte. Et le cri "jajaja", c'est pour avertir de la présence d'un serpent.* »

Concernant la « grammaire » de ces oiseaux, il en a déjà eu de premiers aperçus à l'époque : *« J'avais remarqué qu'il y avait des combinaisons de sons et que cela fonctionnait comme des phrases,* assure Toshitaka Suzuki. *Par exemple, quand ils trouvent une pie-grièche bucéphale, un de leurs prédateurs, ils font "pîtspi-jijiji" pour réunir d'autres oiseaux de leur groupe et la chasser collectivement.* »

Comment prouver, avec des données scientifiquement solides, que la mésange de Chine communique bien par un langage ? Pour commencer, comment s'assurer que le son "jajaja" désigne bien un serpent ? Il entreprend d'enregistrer les sons et de les diffuser par un haut-parleur en faisant bouger une branche d'arbre qui ressemble à un serpent. Alors qu'elles restaient indifférentes en l'absence du cri, *« les mésanges sont allées vérifier attentivement ce que c'était. Vu leur réaction, il est évident qu'elles l'ont prise pour un serpent.* »

Si ces résultats sont globalement acceptés auprès des autres éthologues travaillant sur la communication animale, la tâche était plus ardue pour prouver l'existence d'une « grammaire ». En choisissant le son « pîtspi-jijiji » comme objet de sa recherche, l'éthologue diffuse l'enregistrement de la combinaison inverse, « jiji-pîtspi ». Pas de réaction ! Pour aller plus loin, il décide de s'inspirer de l'humoriste nippon Lou Ohshiba, dont les blagues consistent à remplacer certains mots japonais par leur équivalent en anglais. *« Pour que le public comprenne ces phrases, il faut réunir deux conditions : connaître les mots en anglais et respecter la grammaire du japonais. L'objectif de mon expérimentation était de savoir si les mésanges ont la même capacité syntaxique que nous* », explique Toshitaka Suzuki.

Des travaux qui suscitent des débats parmi les chercheurs

Pour cela, il réalise une bande-son en mélangeant le cri de la mésange de Chine avec celui de la mésange boréale. En effet, le scientifique avait déjà établi que le « jijiji » de la première correspondait au « dididi » de la seconde. À l'aide d'un haut-parleur, il fait écouter aux mésanges de Chine la phrase « pîtspi-dididi ». Conclusion : *« Les mésanges de Chine y ont réagi de la même manière, mais au son inversé — "dididi-pîtspi" — elles n'ont eu aucune réaction. Cela veut dire non seulement qu'elles s'expriment en suivant une grammaire, mais aussi que celle-ci a une certaine flexibilité* », s'enthousiasme le chercheur.

Il tente alors une autre expérimentation avec une pie-grièche bucéphale empaillée. Quand les sons « pîtspi » et « jijiji » étaient diffusés sur deux haut-parleurs, cela ne provoquait pas de réaction. Mais quand ils le furent par une seule source, les mésanges ont attaqué la pie. *« Cela prouve qu'elles ont la faculté de reconnaître deux mots comme une unité* », soutient l'éthologue.

Saluant *« l'un des plus importants travaux »* de ces dernières années dans le domaine de la communication animale, Philippe Schlenker, linguiste et directeur de recherche CNRS à l'institut Jean-Nicod,

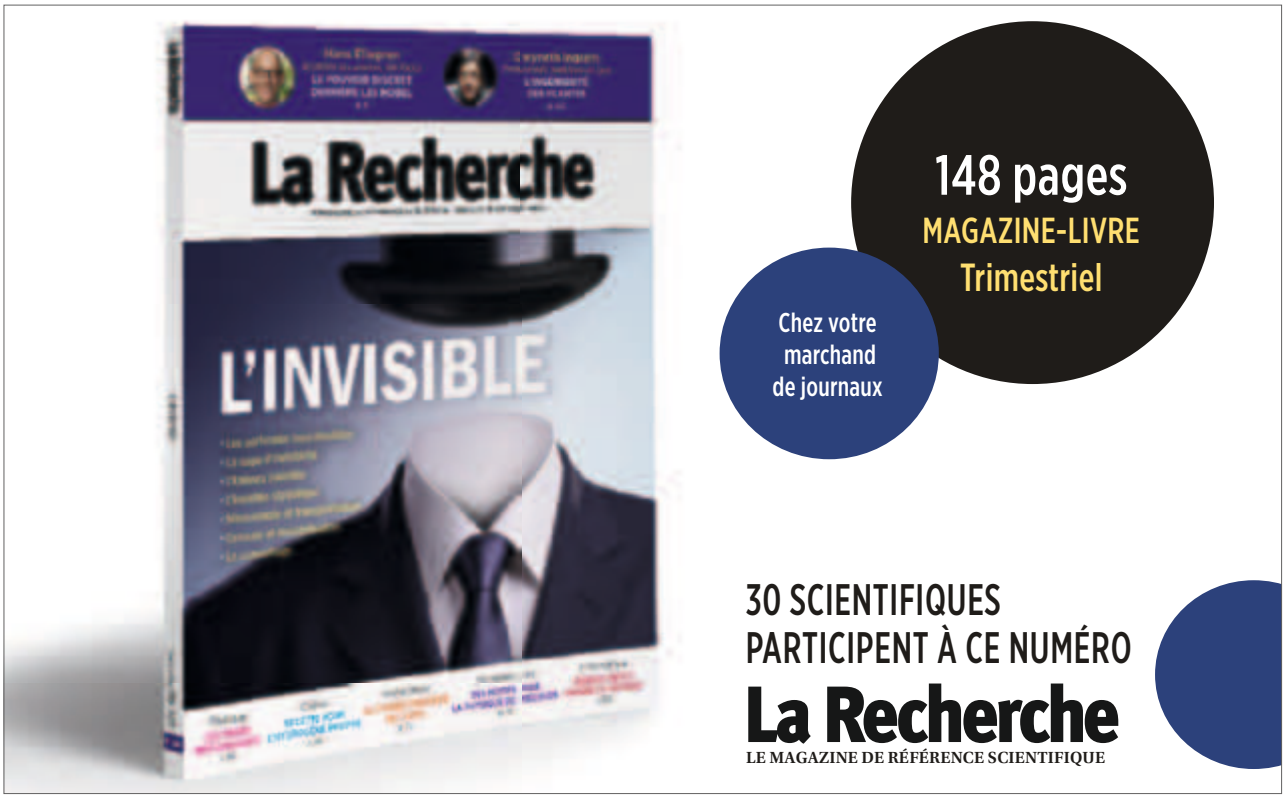
relève la similarité entre les résultats de ces études et celles menées sur les cris du chimpanzé par le biologiste français Maël Leroux. *« Leurs recherches pourraient permettre de comparer des langages animaux entre eux pour retracer l'évolution biologique de la communication animale »*, commente Philippe Schlenker.
Chercheuse à l'université de Zurich (Suisse) spécialisée en communication animale, Mélissa Berthet observe néanmoins que les travaux de l'éthologue japonais, bien qu'approuvés par la majorité des chercheurs, suscitent des débats : *« Selon certains scientifiques, il peut y avoir d'autres choses que la grammaire qui entrent en jeu. Les observations pourraient s'expliquer par "l'urgence chronologique", c'est-à-dire que les oiseaux mettent la chose la plus urgente et une autre chose moins urgente après, donnant ainsi l'impression qu'il y a une règle fixe. »*
Ses expérimentations, en combinant des cris de deux espèces, ne font pas non plus

NHK

Toshitaka Suzuki effectue ses recherches sur le terrain, à Karuizawa (Japon).

l'unanimité. *« Puisqu'il s'agit d'un son composé, il ne peut pas venir d'un seul individu. Or, les mésanges de Chine le comprennent. Néanmoins, quand le cri vient de deux haut-parleurs différents, ce qui suggère aussi qu'il y a deux individus, les oiseaux ne le comprennent pas. Il manque quelque chose pour certains chercheurs »*, poursuit Mélissa Berthet.
Malgré ces objections, Toshitaka Suzuki poursuit ses recherches. Son but : prouver que le langage humain n'est qu'un langage animalier parmi d'autres. D'où ses critiques à l'égard des études menées sur les chimpanzés par le psychologue américain Herbert Terrace dans les années 1970 *(lire l'encadré ci-contre)*. L'une des plus célèbres avait conclu à l'absence de règles grammaticales et de syntaxe dans la communication du primate. *« Ils ont extirpé ces animaux de leur habitat naturel et ont essayé de leur apprendre la langue des signes américaine. Dans ces conditions, il est normal qu'ils n'aient pas pu montrer leurs capacités de communication. Dans leur habitat naturel, ils communiquent de façon très diverse, mais encore aujourd'hui, les études sérieuses sur ce point n'en sont qu'à leurs débuts »*, conclut-il. ■

Yuta Yagishita



Comment l'Indonésie traque les tsunamis

Sur l'île de Sumatra, encore marquée par le tsunami du 26 décembre 2004, un centre de recherche affine ses modèles et développe des systèmes d'alerte de pointe. Avec un objectif : éviter qu'une telle catastrophe ne se reproduise.

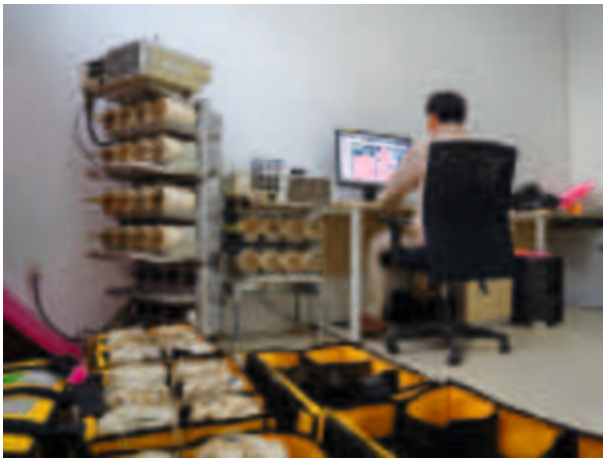
Octobre 2025. Un tremblement de terre a touché les Philippines. Le séisme de magnitude 7,4 a secoué — encore une fois — cette partie du monde. Résultat : au moins 75 morts et près de 30 000 personnes sans domicile. Au cœur de la ville de Banda Aceh, au nord de l'île de Sumatra, des écrans de contrôle du sismographe avaient donné l'alerte. Ici, en Indonésie, des menaces de cette intensité sont plutôt rares. Dans le Centre de recherche et de prévention des risques, en partie financé par l'Unesco, Umar Muskin, sismologue et chef du service, est toujours aux aguets : *« Nous enregistrons en moyenne trois séismes par jour. Au-dessus d'une magnitude 5, cela peut être dommageable si l'épicentre est situé près de zones habitées. Mais la plupart des tremblements de terre sont situés dans l'océan. »*

Sa mission : faire tourner le sismographe 24 heures sur 24, pour que la terrible journée du 26 décembre 2004 ne se reproduise plus. *« Nous sommes mieux équipés qu'à l'époque, mais nous manquons de machines de pointe »*, note le sismologue en scrutant méticuleusement les écrans. En 2004, le séisme de magnitude 9,2 avait déclenché des vagues hautes comme un immeuble de huit étages, s'élevant parfois jusqu'à 30 mètres. Elles ont tué près de 230 000 personnes dans le Sud-Est asiatique et laissé un demi-million d'autres sans domicile. C'est l'un des trois plus puissants séismes jamais enregistrés dans le monde, avec le Chili en 1960 et l'Alaska en 1964. Afin de panser les plaies, le centre de recherche a été créé en 2006, 24 mois après le raz-de-marée.

Des informations en temps réel pour anticiper à tout prix

Umar Muskin vérifie auprès de son équipe que les sismomètres retransmettent correctement, en temps réel, la surveillance des sols. L'équipe a planté 50 machines près du littoral, qui envoient des données toutes les secondes au laboratoire, dans le but d'étudier les vibrations souterraines. *« Il nous faut des machines qui fonctionnent hors ligne, ce serait plus précis en matière de traitement de l'information »*, déplore-t-il en rechargeant les batteries d'un sismomètre. Une fois récoltées, les informations sont traitées puis envoyées au gouvernement. Il faut anticiper à tout prix, grâce à la géologie et à un suivi constant des mouvements de l'océan.

Dans la salle de sismographie, une dizaine de jeunes diplômés déchiffrent des graphiques et surveillent la moindre secousse ressentie sous l'œil attentif du directeur, le Pr Syamsidik. Calme, celui



◄ **De gauche à droite :** plus de vingt ans après le tsunami, des bateaux échoués dans les rues de Banda Aceh témoignent des ravages du raz-de-marée. Au Centre de recherche et de prévention des risques, la salle de mesure en temps réel permet une surveillance 24 h sur 24 des séismes. Sur l'écran, l'un d'eux détecté dans la mer de Banda. Des sismomètres, ici en train d'être rechargés, seront ensuite plantés à différents endroits du littoral de l'île afin d'étudier les vibrations souterraines.

qui dirige près de 85 chercheurs vient de terminer son cours journalier à une cinquantaine d'étudiants sur les risques des tsunamis dans l'archipel. Son prochain cours portera sur la propagation des virus après une catastrophe humanitaire, l'une des autres spécialités de cet expert en génie hydraulique.

Pour le Pr Syamsidik, sa plus grande avancée est d'avoir mis en place une piscine de modélisation à vagues artificielles. Concrètement, il s'agit d'un bassin rempli d'eau dans lequel les scientifiques multiplient les expériences pour mieux comprendre les caractéristiques des masses d'eau. Grâce à un système de propulsion, ils créent une vague, planifient sa durée et la force de la collision. Ils peuvent ensuite gérer la puissance des houles, et ainsi étudier précisément leur impact sur les bâtiments, les arbres ou encore les humains, reproduits en miniature dans l'aquarium. *« Dans l'océan, les tsunamis ne se créent pas uniquement à cause d'un tremblement de terre,* souligne le chercheur, *ils sont parfois dus à des glissements de couches de terre sous l'eau. La géologie des fonds marins est complexe, et les tsunamis sont extrêmement durs à anticiper.* » La piscine a notamment reproduit les vagues du tsunami de Palu, qui s'est abattu sur l'île des Célèbes en 2018. Il avait été provoqué en grande partie par un glissement sous-marin, malgré un séisme en faille coulissante où deux plaques tectoniques frottent horizontalement l'une contre l'autre.

Aider la région à consolider ses infrastructures

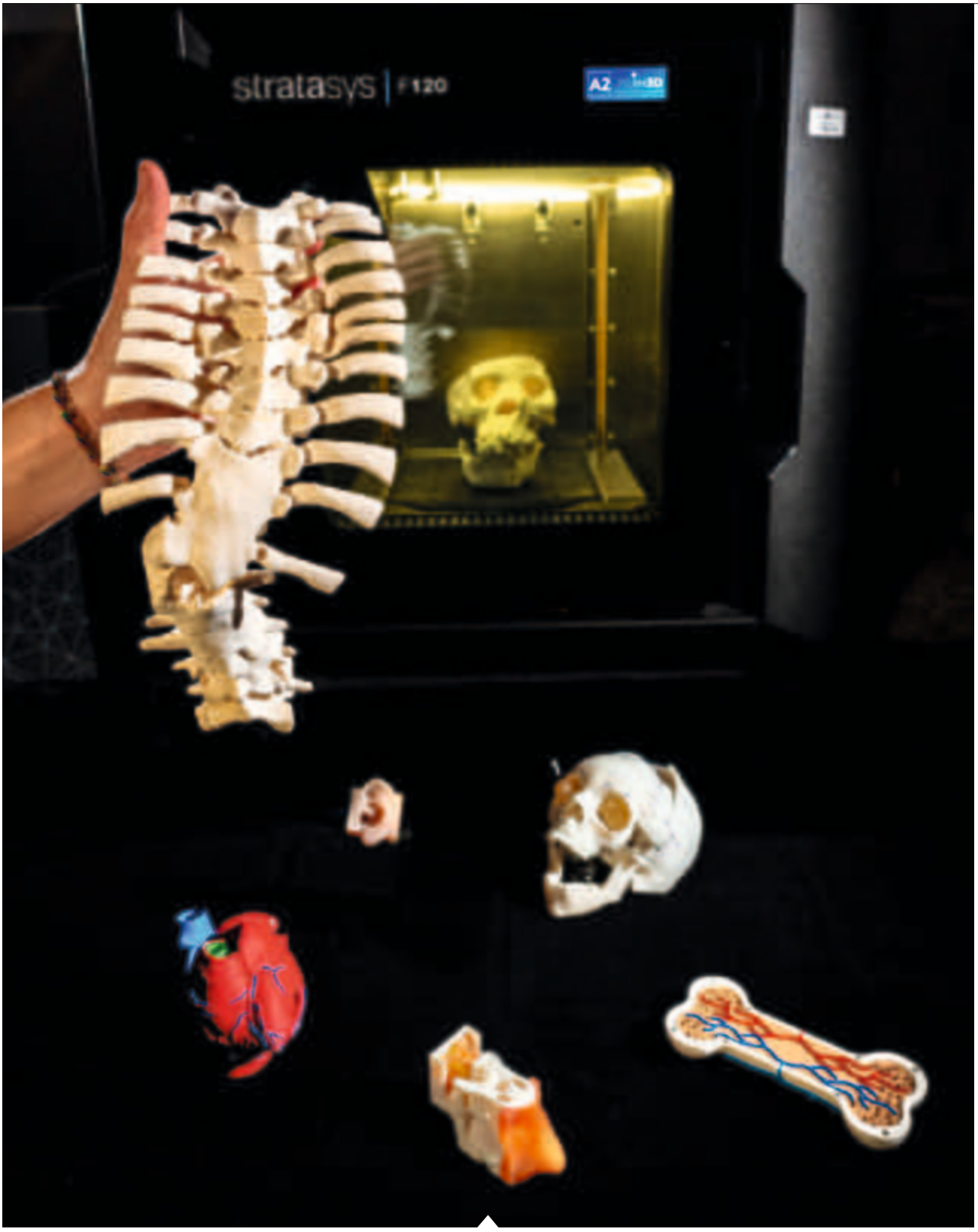
La présence d'un bassin à vagues aide également les chercheurs à mieux comprendre d'autres événements qui menacent le pays. Ainsi, il a permis de reproduire des inondations et débordements de rivières, provoquées par des épisodes pluvieux extrêmes liés au réchauffement climatique. La Banque asiatique du développement estime qu'avant 2050, 42 millions d'habitations seront envahies par les eaux et 2000 îles seront submergées par la montée de l'océan et les pluies extrêmes. Ce processus force déjà de nombreux Indonésiens à l'exil, comme des milliers de familles à Djakarta, menacées par la montée des eaux. *« Est-ce qu'un tsunami majeur pourrait se reproduire ?,* réitère à voix haute le Pr Syamsidik. *Celui de 2004 était le douzième dans cette région depuis près de 7500 ans. Bien avant notre ère, des tsunamis avaient lieu ici. Nous l'avons prouvé en analysant des sédiments récoltés sur des roches d'une grotte. Nous serons encore touchés.* »

Dans les rues de Banda Aceh, les stigmates de la catastrophe sont encore visibles. Ici et là, des panneaux d'évacuation jalonnent aujourd'hui les routes. Trois épaves de bateaux balayés par les vagues trônent dans la ville au milieu de la circulation, vingt ans après. Seule la grande mosquée Baiturrahman n'a pas été balayée par les vagues. L'une des missions actuelles du centre est d'aider la région à consolider ses infrastructures. Écoles, hôpitaux, bâtiments publics, complexes touristiques : tous sollicitent les chercheurs. *« Si un tsunami arrive, que faire avec des centaines d'élèves en bas âge ? Nous développons des protections solides et des procédures d'évacuation, comme au Japon. Face à cette nature imprévisible, la réponse ne peut plus être la fuite ou la panique »,* conclut le Pr Syamsidik. ■ **Paul Boyer**

Photos : Pierre Terraz

« Nous développons des protections solides et des procédures d'évacuation, comme au Japon »

Pr Syamsidik, directeur du Centre de recherche et de prévention des risques, à Banda Aceh



Outils thérapeutiques (en haut, la réplique de la colonne vertébrale d'un patient avant une intervention chirurgicale) et dispositifs destinés à la formation et la recherche des soignants (en bas, différentes reproductions de parties du corps humain) réalisés par l'équipe de Prim3D selon plusieurs techniques d'impression 3D (en haut, une imprimante à dépôt de fil fondu).

Hôpital

L'impression 3D pour une médecine de précision

La plateforme d'impression en relief des Hôpitaux de Paris permet d'obtenir une réplique parfaite d'un élément du corps humain afin de le visualiser avant la pose d'une prothèse ou pour planifier une chirurgie complexe. Ses responsables développent aussi des outils pédagogiques afin d'informer les patients et faire de la prévention.

Par Hubert d'Erceville - Photos : François Guenet/Divergence pour Sciences et Avenir

Soupesant une colonne vertébrale en plastique, Delphine Prieur est fière de présenter les premiers objets médicaux imprimés par la plateforme Prim3D. Pour la jeune patronne de ce service interne de l'AP-HP (Assistance publique–Hôpitaux de Paris), c'est la preuve concrète du potentiel de l'impression 3D comme atout médical. Autour d'elle, de nombreux objets illustrent déjà cette promesse : des crânes, des os, un foie, une oreille, un support de protection de lit médical… *« Destinés aux professionnels de santé, ces dispositifs vont révolutionner les pratiques médicales et hospitalières,* prédit-elle. *L'AP-HP donne ainsi corps à sa volonté d'accélérer l'innovation en santé, en favorisant l'émergence de nouveaux outils au service de la prise en charge des patients.* »

Docteur en neurosciences et spécialiste du management de projets innovants en santé, cette experte en logistique a rejoint l'AP-HP pour créer, organiser et développer ce nouveau laboratoire de production de dispositifs médicaux au service des hôpitaux de l'AP-HP. Un projet original et novateur qui vient d'obtenir un financement de l'État et de la région Île-de-France de 1,8 million d'euros sous forme de subvention de la Banque publique d'investissement. Le recours à cette technologie par l'AP-HP débute en mars 2020. En pleine pandémie de Covid-19, une première plateforme de 60 imprimantes 3D par dépôt de couches de plastique est installée dans l'abbaye de Port-Royal, à l'hôpital Cochin. Fondée par le professeur Roman Khonsari, du service de chirurgie maxillo-faciale de l'hôpital Necker–Enfants malades, elle est financée par une dota-

tion des fondations Hermès et Kering. Cet outil sert à faire face à la pénurie d'approvisionnement de certains équipements de protection individuels et collectifs, ainsi que de pièces détachées (joints, supports, pieds…) nécessaires au bon fonctionnement des appareillages de l'hôpital. Opérationnel jusqu'en mars 2021, son bilan s'avère très positif, avec près de 200 types de pièces produites en urgence à plusieurs dizaines de milliers d'exemplaires.

Forte de cette réussite, l'AP-HP décide de passer à la vitesse supérieure en créant un service intégré couvrant tous les besoins hospitaliers pouvant être assurés par l'impression 3D. Le projet, confié à Delphine Prieur, débouche sur la création en janvier 2023 d'une seconde plateforme, plus scientifique, baptisée Prim3D. Aujourd'hui complètement opérationnelle, elle répond d'abord, comme auparavant, aux besoins d'approvisionnement logistiques de l'hôpital pour réparer ou compléter l'équipement d'un appareil médical, ainsi qu'à la production de pièces uniques ou en petite série, sans recours au moulage.

Mais la plateforme sert désormais, et de plus en plus, à réaliser des outils thérapeutiques ou pédagogiques sur mesure pour informer les patients sur leur pathologie, améliorer le dialogue avec les soignants, faire de la prévention ou optimiser les traitements. D'abord en imprimant une réplique parfaite d'un élément du corps d'un patient afin de le visualiser avant une opération, pour la pose d'une prothèse ou pour planifier une chirurgie complexe. Les ingénieurs de Prim3D partent du fichier informatique du CT-scan (tomodensitomètre) ou de l'IRM (imagerie par résonance magnétique) du patient. Cette imagerie permet de modéliser numériquement, selon leurs densités, les différentes parties internes du corps, comme les poumons, les os, les tissus mous ou les vaisseaux sanguins. Le traitement numérique des pixels acquis permet de détourer chaque organe. Ainsi, pour réaliser le fac-similé d'une grave scoliose à opérer (arthrodèse ou ostéotomie), ils isolent la colonne vertébrale et la reconstruisent informatiquement à l'échelle 1:1 (réelle) de la personne, en un seul élément solidaire, dans un fichier imprimable couche par couche.

Recréer sur mesure des pathologies rares

La représentation fidèle en 3D ainsi obtenue sert d'abord au chirurgien pour planifier son intervention, affiner le choix de la technique opératoire ou prévoir la bonne taille des dispositifs médicaux à mettre en place si nécessaire. Il peut ensuite la présenter à l'équipe médicale et, bien sûr, au patient, pour lui expliquer les différentes phases de son opération. Enfin, elle sert lors de l'intervention pour se repérer sur chaque portion de la colonne.

Ces dispositifs médicaux de planification chirurgicale ne représentent qu'une partie des impressions réalisées par Prim3D. D'autres projets s'articulent autour de la formation et de la recherche. Grâce au PolyJet, qui mixe les matériaux, ou à l'impression de silicone, Prim3D reproduit des éléments anatomiques avec différentes textures, couleurs ou duretés, dans le but de simuler les tissus. Ces fac-similés humains imitent, par exemple, la peau, la chair, des organes ou des

DISPOSITIFS

Quatre technologies d'impression 3D

Prim3D occupe près de 250 m² dans les sous-sols de l'ancien hôpital Broussais, à Paris. Son équipe de trois ingénieurs — de formations généraliste, biomédicale et aérospatiale — travaille avec des chercheurs, médecins, infirmiers et stagiaires, sur une quinzaine d'imprimantes exploitant quatre technologies complémentaires d'impression 3D.

DÉPÔT DE FIL FONDU

Cette technologie classique dépose couche par couche un filament thermoplastique fondu, de l'ABS (acrylonitrile butadiène styrène), polymère robuste ; du PLA (acide polylactique), biodégradable ; des composites renforcés par fibres de verre ou de carbone ; ou du TPU (polyuréthane thermoplastique), élastomère souple.

STÉRÉOLITHOGRAPHIE

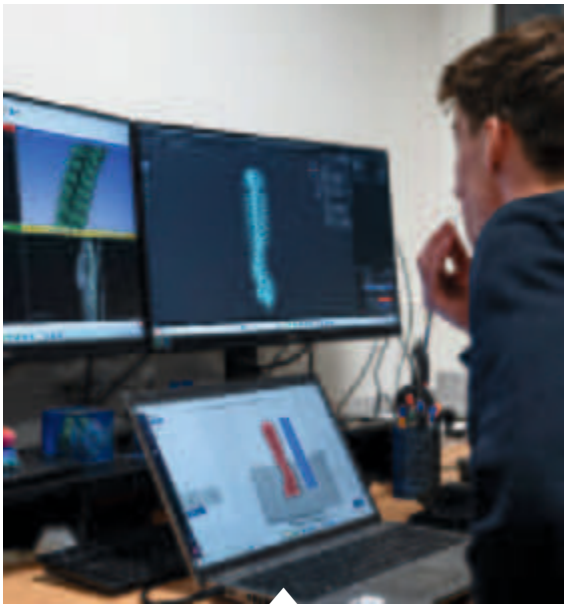
Plus avancée, la stéréolithographie (SLA) est une photo-polymérisation : un laser solidifie sélectivement une résine photosensible contenue dans un bac, avec une grande précision.

POLYJET

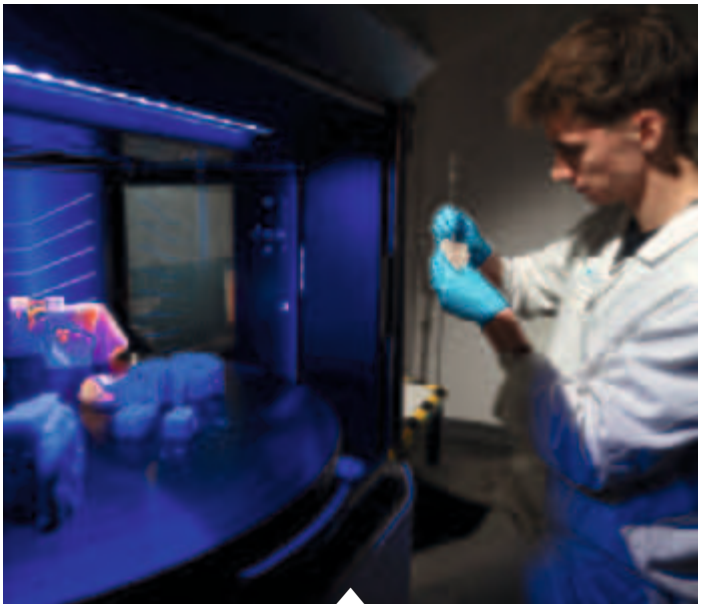
Complexe, l'impression PolyJet projette simultanément plusieurs résines, combinant couleurs, transparence et degrés de souplesse au sein d'un même objet. Elle offre une reproduction très fine de structures hétérogènes.

IMPRESSION 3D DIRECTE DE SILICONE LIQUIDE

Installée récemment en partenariat avec la start-up Lynxter, cette technologie novatrice sert à réaliser des dispositifs médicaux souples, réalistes et biocompatibles, ayant la propriété de tissus humains, jouant sur la texture, l'élasticité ou l'opacité, et respectant les normes médicales.



À partir de l'IRM d'un patient, un modèle anatomique est créé en 3D sur ordinateur avant l'impression.



En mixant les matériaux, l'impression PolyJet permet une reproduction très fine des différentes structures d'un organe.

os. *« Notre objectif,* met en avant Delphine Prieur, *est de remplacer certains éléments organiques — animaux ou humains — par des simulateurs anatomiques imprimés en 3D. Les chirurgiens en formation ou en exercice les utilisent, comme lors d'une opération réelle, pour tester différentes techniques chirurgicales complexes ou innovantes.* » Ces simulateurs servent aussi à recréer sur mesure différentes situations pathologiques, y compris rares, qui ne sont quasiment jamais rencontrées. Ils se substituent alors au vrai corps humain, dont l'usage est très encadré par la loi.

Comme certaines opérations exceptionnelles de la boîte crânienne, où un modèle imprimé destructif sert de cobaye aux élèves pour s'exercer à l'avancement monobloc de la face chez de jeunes patients atteints de craniosténose. Une opération rare, mais qui nécessite un grand savoir-faire et impose aux chirurgiens une mise à jour technique permanente.

C'est aussi le cas du démonstrateur pédagogique d'otoscopie Tympano, qui reproduit en PolyJet une oreille humaine avec ses éléments externes et internes. Les oto-rhino-laryngologistes (ORL) peuvent s'y entraîner au diagnostic fin d'altérations du tympan avec un otoscope. Un jeu de 30 éléments à insérer dans le modèle montre autant de pathologies à identifier. Une vingtaine de nouveaux éléments/pathologies sont en préparation. Un second modèle sert de support d'entraînement pour réaliser des chirurgies dans l'oreille interne, derrière le tympan, sans l'endommager. Il reprend les couleurs, la plastique et la souplesse d'une vraie oreille humaine, ainsi que les épanchements sanguins. Ce simulateur, mis au point par Prim3D, vient d'être commercialisé par l'entreprise Medprint, une start-up française spécialisée dans ce domaine. L'AP-HP perçoit une redevance pour chaque modèle vendu, ce qui permettra, à terme, de rentabiliser ce projet.

« Les chirurgiens utilisent ces simulateurs anatomiques comme lors d'une opération réelle, pour tester différentes techniques »

Delphine Prieur, directrice opérationnelle de la plateforme Prim3D de l'Assistance publique-Hôpitaux de Paris

Des implants osseux et des prothèses personnalisés

Prim3D monte progressivement en compétence avec l'impression de véritables tissus humains ou de tissus compatibles. Voire réalise des impressions qui reproduiraient les comportements du corps humain dans certaines situations, par exemple, en radiologie pour les imageries à rayons X. De nombreux tests préalables seront nécessaires, notamment pour valider les modèles, vérifier la qualité d'impression et l'innocuité des maté-

QUESTIONS À

Roman Khonsari

Professeur dans le service de chirurgie maxillo-faciale et chirurgie plastique de l'Hôpital Necker-Enfants malades, à Paris, directeur médical et scientifique de Prim3D

« Des pièces pour reconstruire un crâne »

Vous êtes l'un des premiers à recourir à l'impression 3D pour des dispositifs médicaux. Pourquoi ?
Toutes les interventions maxillo-faciales impliquant une chirurgie osseuse peuvent nécessiter des guides chirurgicaux. Ils sont imprimés en 3D, à la demande, adaptés à la morphologie de chaque patient. En plus, nous imprimons des pièces de cranioplastie pour reconstruire un crâne fracturé, ou des implants sur mesure. Les fragments osseux manquants du visage peuvent être remplacés par un objet imprimé selon les caractéristiques du patient. Ces impressions, précises au dixième de millimètre, ont des propriétés physiques qui permettent de s'intégrer au corps humain.

Comment se place l'impression 3D dans les autres pratiques cliniques ?
L'impression 3D permet de travailler avec des matériaux de plus en plus variés, ouvrant la voie à la fabrication de modèles anatomiques ultraréalistes reproduisant l'os, les tissus mous, les muscles, voire la circulation sanguine. Ces simulateurs copient fidèlement la complexité du corps humain et se rapprochent des sujets anatomiques utilisés historiquement pour la formation des chirurgiens. Ils offrent un outil d'apprentissage sans risque, idéal pour s'exercer à des gestes techniques délicats, avant de passer à des séances de dissection sur cadavres pour les interventions les plus complexes.

Quels sont les freins actuels à l'impression 3D en médecine ?
Le règlement européen 2017/745 impose une traçabilité et une certification très complexes pour tout dispositif médical, en priorité afin de protéger les patients. Même les modèles anatomiques spécifiques d'un malade sont considérés comme des dispositifs médicaux soumis à des règles très exigeantes de production. Cette procédure adaptée à la production industrielle s'avère compliquée à appliquer à l'impression 3D médicale, qui repose sur la fabrication de pièces uniques ou sur mesure, souvent dans un délai très court pour un patient donné. La réglementation devra être discutée et adaptée afin de permettre d'implanter l'impression 3D au plus proche du soin dans les hôpitaux. ■

Propos recueillis par H. d'E.

riaux et créer des dispositifs médicaux stérilisables. « *Mais, à plus long terme, il sera possible de produire des implants osseux et des prothèses personnalisés, des instruments chirurgicaux spécifiques, des guides de coupe, des implants d'apposition ou des équipements médicaux d'aide à la rééducation, comme des orthèses ou des dispositifs d'assistance pour la rééducation* », projette déjà Delphine Prieur.
Les donneurs d'ordre sont d'abord internes. Les services des 38 hôpitaux de l'AP-HP peuvent réclamer une impression 3D ou la conception d'un nouvel outil innovant, de type appareillage, calibrage, simulateur ou reproduction du corps humain. D'autres projets émanent d'entreprises, d'universités ou d'instituts de recherche ayant besoin d'outils innovants ou de simulateurs anatomiques afin de tester des solutions, des traitements ou des dispositifs médicaux, à des fins de recherche et développement ou de formation.

Un développement rapide sur tout le territoire

L'impression 3D hospitalière se développe rapidement sur tout le territoire. Même si, économiquement, elle n'est pour l'instant ni rentable ni bénéficiaire, elle réduit déjà certaines dépenses et génère de la propriété intellectuelle qui commence à produire des revenus. Mais c'est surtout un pari de compétence qui répond aux besoins des soignants et des patients, et vise à dynamiser la recherche en santé.
Pionnière, Prim3D échange son savoir-faire avec un réseau national de plateformes similaires installées dans plusieurs centres, comme les Hospices civils de Lyon, à Brest, Lille, Besançon, Caen ou Toulouse. Plus de la moitié des 32 centres hospitaliers universitaires (CHU) de France sont désormais regroupés au sein d'un réseau 3D afin de déployer ces technologies. Beaucoup critiqué, l'hôpital public français reste toujours capable de se montrer à la pointe de l'innovation. ■

STENY SOLITUDE

Équipé d'un casque Apple Vision Pro, le Dr Daniel Pietrasz procède à l'ablation d'une tumeur du foie chez une patiente.

Un casque immersif guide le chirurgien

La technologie de la réalité mixte est testée à l'hôpital Paul-Brousse, à Villejuif. Un dispositif numérique concentre toutes les données utiles devant les yeux du chirurgien afin de sécuriser son geste technique.

« *On peut vérifier que la patiente reste parfaitement endormie, s'il vous plaît ?* » Un frisson parcourt le bloc opératoire du centre hépato-biliaire Henri-Bismuth de l'hôpital Paul-Brousse-AP-HP, à Villejuif (Val-de-Marne). Le Dr Daniel Pietrasz est en pleine ablation d'une tumeur au foie. Le chirurgien découpe la grosseur centimètre par centimètre depuis environ deux heures, et ce n'est pas le moment de se réveiller… L'anesthésiste s'en assure aussitôt, tout ira bien. Un épiphénomène pour cette opération dont la particularité est surtout de tester pour la première fois un casque de réalité mixte sur une hépatectomie un peu complexe. L'apparition autour de 2015 de casques et lunettes immersifs ciblant un large public (Sony, Microsoft, Meta, HTC Vive…) a attiré assez vite les chirurgiens, toujours en quête d'améliorer leur pratique. Ce jour de décembre 2025, c'est le casque Apple Vision Pro qui est porté par Daniel Pietrasz. Commercialisé depuis 2024 dans 13 pays, le masque futuriste de 300 grammes (sans la batterie) est confortable et offre une expérience interactive assez impressionnante, tant par sa qualité d'image que la facilité à interagir avec la sphère visuelle créée autour de son utilisateur. L'écran incurvé en 3D offre en effet un

champ de vision à 360 degrés. C'est là que sera notamment projetée l'image acquise par une caméra insérée dans l'abdomen de la patiente. Car comme c'est désormais le standard, l'opération se fait par cœlioscopie : de petites incisions d'un centimètre pratiquées dans la paroi abdominale permettent de glisser, outre une sonde dotée d'une caméra et d'un système d'éclairage — l'endoscope —, des trocarts, de grosses aiguilles dotées de pinces ou de ciseaux actionnables.

Des fenêtres virtuelles que l'on peut déplacer ou agrandir

En principe, le médecin se guide à partir de la vidéo provenant de l'endoscope et projetée sur de grands écrans dans la salle d'opération. Mais cette fois, c'est donc en réalité mixte que le chirurgien opère. *« Je peux déplacer d'un pincement de doigt les fenêtres virtuelles, zoomer, les placer au centre, à gauche, à droite, en bas, en haut, et voir mon environnement en transparence »*, décrit Daniel Pietrasz. Le casque filme la scène autour du bloc opératoire pour la projeter en direct sur l'écran, de sorte qu'il ne coupe pas le chirurgien de son environnement.

Sans fil, à l'exception d'une batterie de 350 g accrochée à la ceinture, le dispositif est d'abord calibré par Steny Solitude, ingénieur et cofondateur de la société Clear Surgery en 2025 avec Julien Isman. La start-up est destinée au développement des programmes permettant d'afficher et de rendre interopérables les modalités d'imagerie médicale (écho, vidéo, scan, IRM…) et toutes les données du patient. *« Après plus de dix ans passés à la conception de salles d'opération, peut-être un millier dans ma carrière, j'étais lassé d'entendre les chirurgiens se plaindre »*, confie Julien Isman. Les opérations en mini-invasif étant devenues le standard pour un large nombre d'indications, les écrans ont pris une place prépondérante au bloc. *« La réalité mixte offre une solution pour remplacer le système d'écrans du bloc à 100 000 euros par un dispositif à 4000 euros affichant 23 millions de pixels — contre 8 millions de pixels pour la 4K »*, détaille-t-il. Clear Surgery vise ainsi à créer une sphère numérique personnelle, où le chirurgien affiche les données dont il a besoin, y compris le dossier du patient.

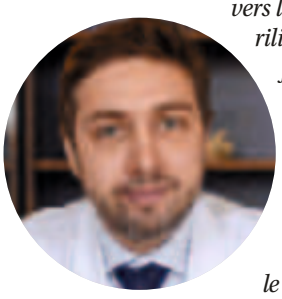
Le dispositif vise à créer une sphère numérique personnelle, où le chirurgien affiche les données dont il a besoin, y compris le dossier du patient

Pour cette première hépatectomie, outre le flux vidéo de l'endoscope, le chirurgien dispose d'une reconstruction en 3D du foie avec la grosseur et les principaux vaisseaux sanguins à éviter, ou à suturer si nécessaire. À plusieurs reprises, Daniel Pietrasz lâche ainsi une des pinces plongées dans l'abdomen, tourne la tête et l'actionne dans le vide de sa main droite. De quelques mouvements du poignet, il zoome et fait pivoter le modèle 3D — visible de lui seul —, avant de reprendre sa position aux manettes des trocarts. Il évalue ainsi le juste passage pour conserver une « marge saine » autour de la tumeur tout en limitant la section de vaisseaux importants. De quoi possiblement réduire l'impact de la chirurgie sur l'organisme et *in fine* permettre une meilleure récupération au patient.

Une technologie qui doit être perfectionnée

« Cela a clairement changé la donne. Ça évite d'avoir à tout lâcher, de se retourner vers l'ordinateur, se déstériliser, se restériliser… Si je n'avais pas eu le casque, je n'aurais probablement consulté le modèle 3D qu'une seule fois. Parce que c'est une vraie interruption de tâche, qu'il faut éviter au maximum. » Du côté de l'endoscope, *« j'ai pu positionner l'image projetée dans le casque sur le ventre du patient, presque comme si je voyais en transparence son abdomen,* explique Daniel Pietrasz. *L'idée, c'est aussi d'améliorer la cohérence entre la façon de regarder et la coordination des mains »*, précise-t-il.

Durant plus d'une heure, tout se passe bien. Puis Steny Solitude nous propose de tester le second casque à disposition. À peine enfilé, on entend Daniel Pietrasz prévenir : *« Ça lague là… Oui ça lague. »*

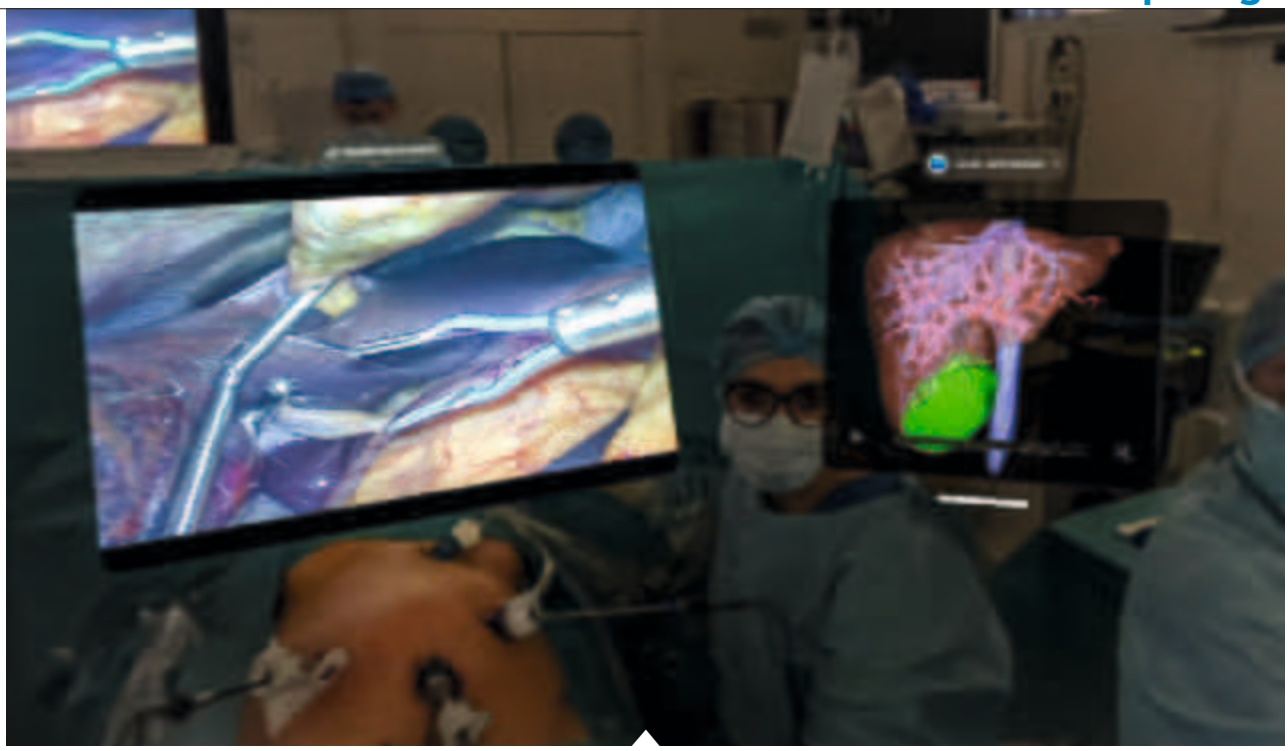


PR GREGORY

THOMAS GRÉGORY Chef du service de chirurgie orthopédique et traumatologique de l'hôpital Avicenne, à Bobigny. Responsable de l'équipe Santé & Numérique à l'université Sorbonne Paris-Nord

« Le futur est à la miniaturisation et à l'ajout d'IA »

« Après notre première mondiale en réalité augmentée réalisée en 2017 avec les HoloLens de Microsoft, les promesses étaient incroyables. Cela permettait de voir le corps en transparence. L'ergonomie était certes très perfectible, mais comme l'étaient les premiers smartphones. Ces dispositifs permettent surtout aux chirurgiens d'être augmentés tout en restant stériles. C'est un outil d'information et de communication précieux. Après des dizaines d'opérations à travers le monde, l'élan a été freiné, à la fois par le Covid et par la succession des casques de différentes marques. Mais l'intérêt reste fort, parce qu'ils rendent le chirurgien connecté. Aujourd'hui, l'Apple Vision Pro que nous utilisons aussi est remarquable. Mais le futur est encore à la miniaturisation et à l'ajout d'algorithmes d'IA qui permettront bientôt de conseiller le chirurgien en direct. »



DANIEL PIETRASZ

Dans un champ de vision à 360° retransmis par le casque, le chirurgien dispose du retour vidéo de l'endoscope (à gauche) et d'un modèle 3D du foie de la patiente où figurent les vaisseaux sanguins et la tumeur (en vert).

L'image se met à saccader. Le chirurgien retire alors le casque pour poursuivre l'opération sur l'écran du bloc, sans aucune conséquence pour la patiente. Julien Isman explique après coup : l'allumage de ce second casque non compatible a perturbé le système. Reste que le dispositif est en test et qu'avant de remplacer les écrans du bloc, il y a une importante partie technique à maîtriser.

Un nouvel essai vidéo en 3D programmé

Le casque est en effet connecté sans fil à un boîtier indépendant dans le bloc, au sein d'un réseau fermé, non relié au Wi-Fi de l'hôpital. Et pour prévenir le piratage, toutes les données au sein de ce réseau fermé sont elles-mêmes encodées. Une parfaite fluidité nécessite donc une grosse puissance de calcul. Et le simple redémarrage du casque prend ainsi presque cinq minutes. Mais le chirurgien ne remettra celui-ci que pour un dernier petit tiers de l'opération.

« Mais l'expérience est très positive », juge Daniel Pietrasz, qui précise n'avoir aucun lien d'intérêts avec Apple ou Clear Surgery. La première fois qu'il a testé le dispositif il y a un an et demi dans un bloc d'essai, sans vrai patient, il y avait une latence perceptible entre l'image projetée dans le casque et ce qu'il se passait réellement. *« On considère qu'au-delà de 250 millisecondes de latence, le décalage est perceptible par l'œil et donc le cerveau. Aujourd'hui, ce n'était absolument pas le cas. »* Le chirurgien relève un petit bémol : lorsqu'il porte le casque, ses assistants qui tiennent notamment la caméra perdent le contact visuel avec lui. *« En chirurgie, il y a aussi des choses qui passent par le regard ; par exemple lorsque j'incline un peu la tête parce que la caméra n'est pas orientée exactement comme il le faudrait, c'est quelque chose que l'assistant à mes côtés repère et corrige immédiatement lorsque je n'ai pas le casque… »*

La tumeur retirée du foie après environ quatre heures d'opération mesure pas moins de 9 cm de diamètre. Elle sera envoyée au laboratoire pour déterminer si elle est bénigne ou maligne. *« La patiente a bien récupéré et a pu rentrer chez elle quatre jours après »*, précise Daniel Pietrasz. Dès ce mois de janvier, il devait faire un nouvel essai avec, cette fois, un endoscope équipé de deux caméras permettant de retransmettre dans le casque une vidéo en 3D.

Mais le graal serait de disposer de véritables jumeaux numériques à superposer sur la zone opérée, et réagissant en temps réel. Un projet de recherche fondamentale mené par le Dr Nicolas Golse, en collaboration avec l'Inria (Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique), à l'hôpital Paul-Brousse. *« Cela nécessite des modélisations mathématiques très pointues, capables par exemple de simuler les déformations tissulaires, mais également les variations de pression dans les vaisseaux en fonction de la masse hépatique retirée,* explique le chirurgien. *Lorsqu'on retire la moitié d'un foie, comment va se comporter le report de pression et de flux, non seulement dans l'organe opéré mais aussi sur le cœur ? »* Une perspective qui nécessitera d'intégrer des algorithmes d'intelligence artificielle et un système GPS pour que le jumeau numérique se synchronise parfaitement avec les organes. ■

Hugo Jalinière

Des bactéries améliorent la santé mentale

Sous le nom de psychobiotiques, certaines bactéries intestinales sont capables d'influencer l'humeur : elles ont montré un effet positif sur les symptômes dépressifs dans des essais contrôlés. Une piste encore imparfaite, mais qui pourrait bénéficier aux patients résistants aux traitements traditionnels.

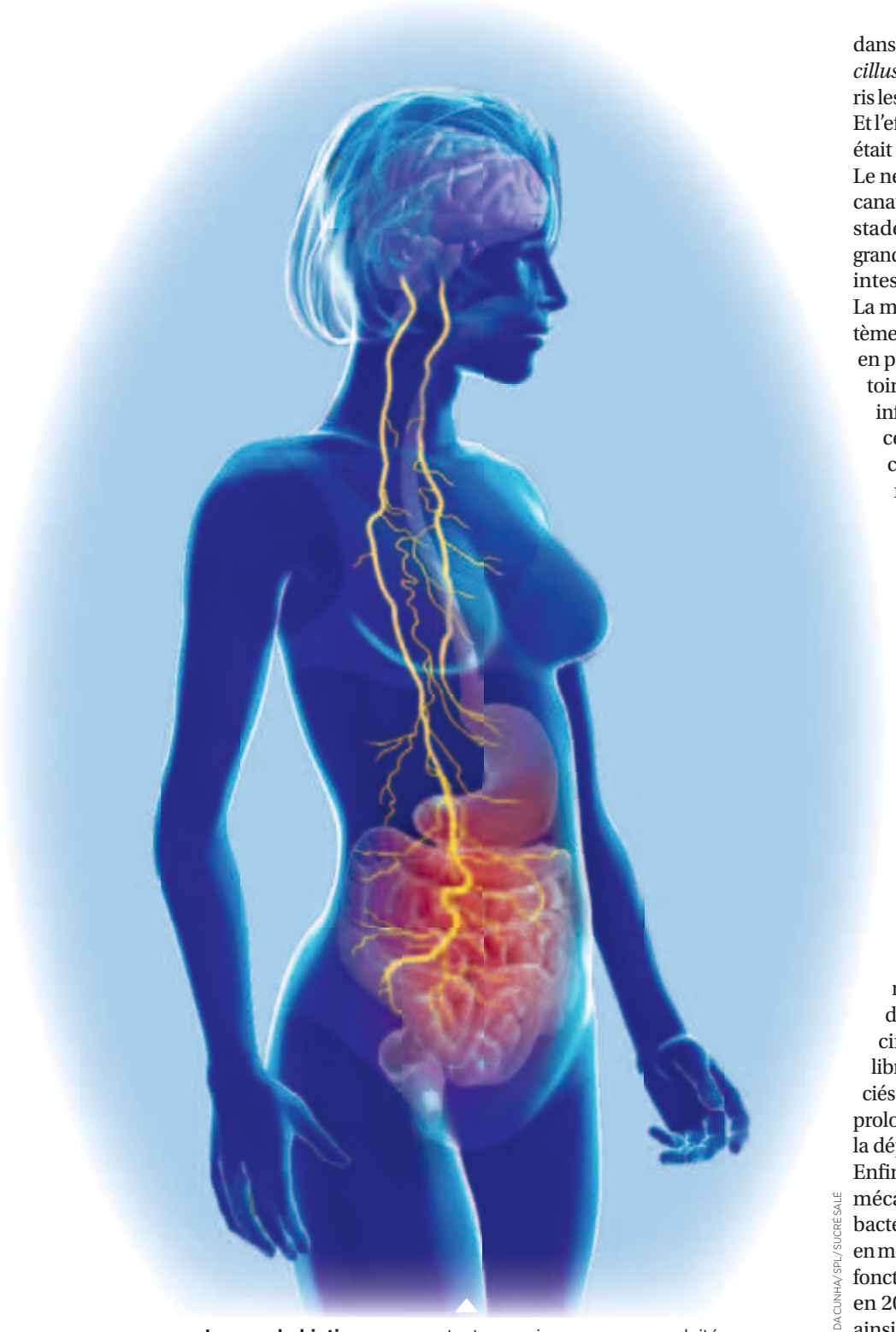
Pendant des décennies, la psychiatrie a dû composer avec le manque d'innovations thérapeutiques. Mais ce temps pourrait toucher à sa fin. Plusieurs indices sont là. Sur le plan politique d'abord : la grande cause nationale 2026 sera la même que celle de 2025, la santé mentale. Mais aussi sur le plan de la recherche : tandis que les psychédéliques font un retour en force, une autre piste, plus discrète mais prometteuse, suscite un intérêt croissant : celle des psychobiotiques. Introduit en 2013 par deux chercheurs irlandais, le neurobiologiste John Cryan et le psychiatre Ted Dinan, ce terme désigne des bactéries — le plus souvent des probiotiques, mais parfois aussi des prébiotiques ou des postbiotiques *(voir les définitions)* — capables d'influencer la santé mentale *via* l'axe intestin–microbiote–cerveau. Contrairement aux probiotiques classiques, omniprésents en pharmacie et surtout destinés au confort digestif ou au bien-être général, les psychobiotiques ont été testés pour leurs effets sur des symptômes psychiatriques précis. Un article paru en août 2025 dans *Nature* montre qu'ils ont fait leur entrée dans le champ de la recherche de premier plan. À travers des expériences de transplantation du microbiote, mais aussi des données mécanistiques solides, les auteurs prouvent que le lien entre microbiote et santé mentale ne relève plus de l'hypothèse. Et que *« les psychobiotiques vont devenir un outil supplémentaire de notre arsenal thérapeutique »*, prévient le psychiatre Guillaume Fond, enseignant-chercheur associé à l'université d'Aix-Marseille *. Toutes les données accumulées ne peuvent pas relever du *placebo*.

Si les psychobiotiques font une percée aujourd'hui, c'est parce que la psychiatrie reste confrontée à des impasses thérapeutiques. Dans 15 à 30 % des cas, les personnes souffrant de dépression ne sont pas soulagées par les traitements classiques. Mais aussi parce que les psychobiotiques empruntent une voie encore sous-exploitée par les médicaments traditionnels : l'axe intestin-cerveau. *« Les premières études montrant un lien de causalité entre l'ingestion d'une souche probiotique et des modifications comportementales chez l'animal datent de 2011 »*, indique Quentin Leyrolle, chercheur en nutrition et neurosciences à l'Inrae (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) et spécialiste des relations microbiote-cerveau. Dans un essai fondateur paru

G. MATHIEU/LEEXTRA

« Les psychobiotiques vont devenir un outil supplémentaire de notre arsenal thérapeutique »

Guillaume Fond, psychiatrie, enseignant-chercheur associé à l'université d'Aix-Marseille



Les psychobiotiques empruntent une voie encore sous-exploitée par les médicaments traditionnels : l'axe intestin-cerveau, une communication établie notamment grâce au nerf vague.

FERNANDO DA CUNHA/SPL/SUCRE SALÉ

dans *Pnas*, l'administration de *Lactobacillus rhamnosus* réduisait chez la souris les comportements anxio-dépressifs. Et l'effet était aboli lorsque le nerf vague était sectionné.

Le nerf vague n'est toutefois qu'un des canaux de communication en jeu. À ce stade, la recherche décrit trois autres grandes voies par lesquelles le microbiote intestinal peut influencer le cerveau. La mieux documentée implique le système immunitaire : le microbiote régule en profondeur les réponses inflammatoires. Des taux élevés de marqueurs inflammatoires — comme la CRP ou certaines cytokines — ont été associés à des formes de dépression plus résistantes aux traitements. *« Environ 40 % des personnes souffrant de dépression présentent une inflammation de bas grade »*, indique Guillaume Fond.

Déséquilibre du microbiote et stress

Une autre voie passe par la réponse au stress. Le microbiote peut moduler l'activité du principal système de régulation du stress, l'axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien, qui commande notamment la sécrétion de cortisol. Cette modulation hormonale s'inscrit dans une voie dite endocrinienne, qui repose sur des signaux produits par l'intestin — notamment hormonaux — capables d'agir à distance sur le cerveau *via* la circulation sanguine. Des déséquilibres du microbiote ont ainsi été associés à une réponse au stress exagérée ou prolongée, fréquemment observée dans la dépression et l'anxiété.

Enfin, le microbiote agit aussi par des mécanismes métaboliques. Certaines bactéries transforment des nutriments en métabolites capables d'influencer des fonctions cérébrales. Une étude publiée en 2024 dans *Cell Reports Medicine* a ainsi montré qu'une souche de *Bifidobacterium* pouvait réduire des comportements anxio-dépressifs chez la souris.

DÉFINITIONS

PRÉBIOTIQUES
Substances alimentaires, généralement des fibres non digestibles, qui servent de nourriture aux bactéries bénéfiques du microbiote. Ainsi, les prébiotiques participent à son équilibre. On les trouve notamment dans les fruits, légumes et céréales riches en fibres.

PROBIOTIQUES
Micro-organismes vivants, essentiellement des bactéries, qui, ingérés en quantité suffisante, peuvent exercer un effet bénéfique sur la santé en contribuant à enrichir le microbiote intestinal. On les trouve dans des aliments fermentés (yaourts, kéfir…) ou sous forme de compléments alimentaires.

POSTBIOTIQUES
Substances produites par les bactéries intestinales ou issues de leur dégradation — métabolites, fragments cellulaires ou bactéries inactivées. Contrairement aux probiotiques, ils ne contiennent pas de micro-organismes vivants, mais peuvent néanmoins exercer des effets biologiques sur l'organisme.

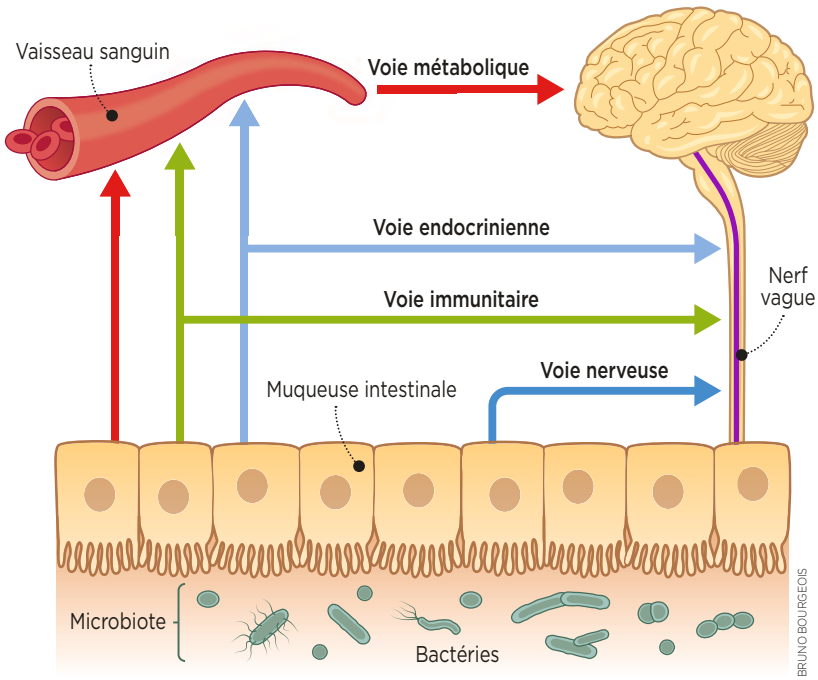
SYMBIOTIQUES
Associations de micro-organismes vivants et de nutriments conçus pour favoriser leur activité dans l'intestin. Contrairement à une simple addition de probiotiques et de prébiotiques, les symbiotiques visent une action coordonnée, censée renforcer l'effet global sur le microbiote.

L'effet passe par un métabolite dérivé du tryptophane (un précurseur de la sérotonine) et s'accompagne d'une baisse de l'inflammation cérébrale. *« En fait, les bactéries intestinales n'agissent pas directement sur les neurones, mais modulent des systèmes biologiques qui, eux, dialoguent avec le cerveau »*, précise Jane Foster, neuroscientifique à l'université Southwestern du Texas (États-Unis).

Associer les psychobiotiques aux antidépresseurs

Cependant, entre la preuve en laboratoire et l'efficacité au lit du patient, le fossé est souvent large. Concernant les psychobiotiques, il commence à se combler. Certaines équipes ont testé des approches expérimentales visant à modifier profondément le microbiote. Dans des essais pilotes, la transplantation de microbiote fécal chez des patients souffrant de dépression résistante s'est accompagnée de modifications des symptômes psychiatriques. Des résultats encore exploratoires, mais qui renforcent l'idée d'un lien de causalité.

Des stratégies plus ciblées ont ensuite été évaluées, en particulier avec des probiotiques. Aujourd'hui, les preuves d'efficacité les plus incontestables concernent la dépression. En 2023, l'équipe de la psychiatre Viktoriya Nikolova a publié dans le *Jama Psychiatry* un essai randomisé et contrôlé mené auprès de 49 adultes souffrant de dépression majeure persistante malgré un traitement antidépresseur. Pendant huit semaines, la moitié des participants a reçu un probiotique multisouches en complément de son traitement, l'autre un *placebo*. À l'issue de l'étude, le score de dépression avait diminué d'environ 8 points dans le groupe psychobiotique, contre 3 à 4 dans le groupe placebo. Des résultats jugés suffisamment robustes pour que les psychobiotiques soient recommandés en complément des antidépresseurs par des organisations internationales comme le Réseau canadien pour le traitement de l'humeur et de l'anxiété, ou encore la World Federation of Societies of Biological Psychiatry. Et cette étude n'est pas un cas isolé. En 2021, une méta-analyse de sept essais cliniques randomisés concluait déjà que les probiotiques font la différence lorsqu'ils s'ajoutent aux antidépresseurs, mais échouent à démontrer un effet lorsqu'ils sont utilisés seuls. À ce stade, les preuves cliniques concernent surtout les probiotiques. Leur efficacité dépend de conditions précises : des doses élevées (de l'ordre d'au moins 10 milliards d'unités par jour) et des interventions suffisamment longues (généralement au-delà de huit semaines). Quant aux prébiotiques, ils sont dégradés par le microbiote et favorisent la production d'acides gras à chaîne courte, des métabolites impliqués dans l'immunité et la com-



Le microbiote intestinal communique avec le cerveau par le nerf vague et le système sanguin, mais aussi par le système immunitaire et les cellules endocrines (hormones).

munication entre l'intestin et le cerveau. En revanche, utilisés seuls, ils n'ont pas démontré de bénéfice clinique robuste sur les symptômes psychiatriques. Leur intérêt semble surtout émerger lorsqu'ils sont associés à des probiotiques. Les postbiotiques requièrent, eux, plus de travaux chez l'humain.

Mais ce n'est pas la seule zone d'incertitude. La question des cibles est majeure. *« L'efficacité des psychobiotiques concerne des sous-groupes. Les patients avec un trouble de santé mentale associé à une inflammation de bas grade, un surpoids ou des comorbidités digestives semblent mieux répondre »*, souligne Guillaume Fond. Le syndrome de l'intestin irritable illustre bien ce lien : il est associé à un risque de dépression 4 à 8 fois plus élevé que la population générale. Certains profils — personnes âgées, femmes en périménopause, sujets exposés au stress ou à des perturbations du microbiote — pourraient aussi être concernés. Bref, la liste est potentiellement longue mais *« nous avons aujourd'hui besoin de biomarqueurs prédictifs pour faire progresser la psychiatrie de précision »*, lance Jane Foster.

Identifier les bonnes souches bactériennes

Un autre défi, tout aussi crucial, reste à relever : identifier les bons psychobiotiques. Même si une méta-analyse de 2024 suggère que les souches de *Lactobacillus* et de *Bifidobacterium*, et surtout leur combinaison, sont les plus prometteuses pour les symptômes dépressifs, *« le psychobiotique miracle n'existe pas »*, prévient Quentin Leyrolle. *« Deux souches appartenant à la même espèce bactérienne peuvent présenter jusqu'à 70 % de variation génétique »*, explique Guillaume Fond. Une différence loin d'être anodine : elle conditionne son fonctionnement biologique, notamment sa capacité à influencer l'inflammation, la réponse au stress ou certaines fonctions cérébrales. Parmi les probiotiques sur le marché, *« il n'y a aucun rationnel dans le choix des sources »*, regrette Guillaume Fond. C'est pourquoi le psychiatre a composé son psychobiotique en sélectionnant huit souches bien précises à partir des données de la science.

Reste un troisième chantier : l'extension des indications. Jusqu'où ces approches peuvent-elles aller au-delà de la dépression ? Dans le trouble bipolaire, un essai contrôlé, paru en 2018 dans *Bipolar disorders*, a montré qu'une combinaison de probiotiques, administrée en complément du traitement standard après un épisode maniaque, réduisait significativement le risque de ré-hospitalisation. Dans l'anxiété, le trouble du déficit de l'attention ou l'autisme, les données demeurent hétérogènes. Dans la schizophrénie, deux méta-analyses publiées en 2025 vont dans le même sens : les paramètres métaboliques et inflammatoires s'améliorent significativement ; les symptômes aussi, mais moins nettement.

Reste donc à passer d'approches encore empiriques à une véritable psychiatrie de précision. *« Dans cinq à dix ans, nous saurons beaucoup mieux identifier les patients susceptibles de répondre aux psychobiotiques »*, anticipe Quentin Leyrolle. Et la carte d'identité d'un microbiote sain sera dessinée, ouvrant la voie à des interventions toujours plus ciblées. ■ **Cécile Coumau**

* Auteur du livre « Bien nourrir son cerveau » (Odile Jacob, 2025).

COMPLÉMENTS ALIMENTAIRES

Entre promesses commerciales et cadre réglementaire

Les progrès rapides de la recherche sur les psychobiotiques commencent à susciter l'intérêt des industriels. Pas celui des laboratoires pharmaceutiques pour qui le champ reste trop immature, mais celui des fabricants de compléments alimentaires qui anticipent l'émergence d'un nouveau marché. En Europe, la réglementation sur les allégations de santé interdit toute promesse suggérant un effet sur une maladie ou un trouble, y compris la dépression, l'anxiété ou le stress. Depuis 2023, le terme « probiotiques » peut figurer sur les emballages, à condition de rester associé à des bénéfices digestifs généraux, comme l'équilibre de la flore intestinale, sans suggérer aucun effet thérapeutique. Le mot « psychobiotique », mentionné régulièrement par les marques, n'a, lui, aucune existence réglementaire. Et certains acteurs exploitent une zone grise. Ils associent les probiotiques à des vitamines, minéraux ou plantes autorisés pour suggérer un effet sur le stress ou l'humeur. En outre, les produits commercialisés s'éloignent largement des protocoles testés dans les essais cliniques, regrette l'International scientific association for probiotics and prebiotics (Isapp). Les cures proposées sont souvent limitées à 14, 21 ou 30 jours, alors que les études montrent un bénéfice si les prises dépassent les deux mois. Quant à la concentration de 10 milliards de bactéries, elle n'est pas non plus toujours atteinte. Ce niveau d'approximation ne serait pas possible avec le statut de médicament, qui exige des preuves cliniques robustes établissant efficacité, dose, sécurité et mécanisme d'action.

Les bouillons reviennent en force

Ce type de préparation a le vent en poupe, notamment auprès des adeptes de cures de santé « détox » et de retraites de jeûne.

Autrefois préparés pour les malades et les convalescents car jugés faciles à digérer, revigorants et nourrissants, les bouillons sont devenus un ingrédient courant de nos cuisines, pour préparer une sauce ou agrémenter un plat de riz. Mais ces dernières années, le « bone broth » (bouillon d'os en anglais) lui vole la vedette. Cette nouvelle star des réseaux sociaux est mise en lumière par diverses marques (Mon bouillon, Dohatsu, Jolly Mama, etc.) qui valorisent son composant phare, le **collagène**, à qui l'on prête des vertus réparatrices.

Une cuisson lente

Un bouillon est obtenu après cuisson, dans un grand volume d'eau, de légumes (champignon, carotte, poireau, céleri, etc.), voire d'épluchures (panais, pomme de terre, etc.), de poisson ou de viande et d'épices (curcuma, gingembre, etc.) ou d'herbes aromatiques. Les bouillons et les **consommés** de viande (poulet, bœuf) mijotent à petit feu, autour de quatre à six heures, les bouillons d'os (carcasses de poulet, porc, bœuf) durant douze à vingt-quatre heures. Cette longue cuisson permet d'en extraire le collagène, une protéine qui lui confère une texture gélatineuse. Les bouillons et consommés se conservent trois à cinq jours au réfrigérateur.

1908

C'est la date de commercialisation en France du premier bouillon cube, le classique Kub Maggi, par Julius Maggi.

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

COLLAGÈNE Protéine structurelle la plus abondante du corps et essentielle dans la construction des tissus (peau, os, cartilage, tendons, etc.). Elle se décompose jusqu'à donner une consistance gélatineuse au bouillon d'os.

CONSOMMÉ Bouillon de viande (bœuf ou volaille) passé à travers un tamis ou filtré au chinois, puis clarifié avec le blanc d'un œuf.

BOUILLON CUBE Cube compact d'un bouillon de légumes ou d'un fond de viande déshydratés. Utilisé pour rehausser le goût des plats, il se dissout dans l'eau.

Ils assurent une bonne hydratation

Les bouillons de légumes apportent en petite quantité des électrolytes (sodium, potassium, magnésium) qui aident à maintenir une bonne hydratation, surtout après un exercice ou une maladie. De même, lorsque les os de viande cuisent très longtemps, les minéraux (calcium, phosphore, fluor, etc.) emprisonnés dans le tissu osseux se libèrent peu à peu dans le bouillon. Par exemple, l'extraction de calcium augmente de 10 % après huit heures de cuisson (1). Toutefois, ces quantités restent modérées. 100 ml de bouillon d'os de bœuf fourniraient seulement 6 mg de calcium et 1,8 mg de magnésium (2).

Riche en protéines

Peu caloriques car pauvres en matières grasses, les bouillons de viande et d'os fournissent des acides aminés, constituants des protéines qui participent notamment au renouvellement des tissus musculaires, de la peau et des os. Exemple avec le bouillon d'os de poulet de la marque Mon bouillon, qui renferme 6,25 g de protéines pour une tasse de 250 ml. Au fil de la cuisson, la matrice de l'os libère notamment de belles quantités de collagène (8,75 g/250 ml de bouillon d'os de l'Atelier Nubio). Non assimilable par l'organisme sous cette forme, le collagène est dégradé au niveau des intestins en acides aminés (glycine, proline, hydroxyproline, etc.), qui peuvent être utilisés par l'organisme pour fabriquer à nouveau des protéines.

Pour une digestion plus facile

Ces peptides de collagène exerceraient un rôle prébiotique, nourrissant la croissance de bactéries bénéfiques pour l'intestin et favorisant ainsi le développement d'un microbiote de bonne qualité (3). Les bouillons d'os aideraient également à soulager l'inflammation de la barrière intestinale et à améliorer le fonctionnement de cette dernière (4). Des travaux menés sur des souris atteintes de colite ulcéreuse (une maladie inflammatoire chronique de l'intestin) montrent que la consommation de bouillons d'os peut réduire les lésions et limite l'expression d'interleukines pro-inflammatoires, suggérant un effet anti-inflammatoire (2). Toutefois, ces effets constatés sur l'animal n'ont pas été démontrés chez l'humain.

Attention au sel

Prudence avec les formules toutes faites. Il faut veiller à ce que le sel ne soit pas le premier ingrédient inscrit sur la liste. À éviter aussi, les bouillons industriels — tels les **bouillons cubes** — contenant des arômes artificiels et du glutamate monosodique (E621). Cet exhausteur de goût, présent dans les bouillons de volaille ou de bœuf, est pointé du doigt pour ses potentiels effets néfastes sur la santé. Les bouillons affichant sur leurs emballages *« dégraissé »* ou *« faible teneur en matière grasse »* contiennent aussi généralement des sucres ajoutés (sirop de glucose, etc.), comme les bouillons de volaille classiques. Certains bouillons déshydratés comportent également de l'huile de palme. ■

Sylvie Boistard

FRANCIS BERENBAUM Chef du service de rhumatologie à l'hôpital Saint-Antoine, à Paris, et membre de l'équipe Pathologies articulaires associées aux maladies métaboliques et à l'âge, Sorbonne Université-Inserm*

Pas d'effet du collagène sur l'arthrose

« Il n'y a aucun essai clinique montrant un intérêt des bouillons d'os ou des compléments alimentaires riches en collagène pour préserver les articulations. Tout au mieux, ils auront un effet *placebo* sur les douleurs de l'arthrose. En effet, une fois ingéré, le collagène est hydrolysé en oligopeptides, lesquels, pour former nos divers tissus (peau, cartilage, os, etc.), vont reconstituer dans l'organisme un ensemble de protéines, mais pas spécifiquement du collagène. La meilleure solution pour préserver la santé des os et du cartilage est de garder un bon apport en protéines, quelles qu'elles soient. »

* Coauteur avec Jérôme Auger du « Grand Livre de l'arthrose », Eyrolles, rééd. 2025.

(1) Essential and toxic metals in animal bone broths, Hsu DJ. et al., *Food and Nutrition Research*, 2017.

(2) Analysis of the Anti-Inflammatory Capacity of Bone Broth in a Murine Model of Ulcerative Colitis, Mar-Solis L. et al, *Medicina*, 2021.

(3) Collagen-derived peptides as prebiotics to improve gut health, Ren B. et al, *Current Opinion in Food Science*, 2024.

(4) Bone Broth Benefits: How Its Nutrients Fortify Gut Barrier in Health and Disease, Matar A. et al., *Digestive Diseases and Sciences*, 2025.

RENAUD BERNADET - INRAP

La restauration du chaudron en bronze d'origine grecque ou étrusque, mis au jour dans la tombe de Lavau, a nécessité près de 700 heures de travail en raison de ses dimensions impressionnantes : un mètre de diamètre pour une hauteur d'environ 60 cm.

Lavau
Les trésors du prince celte

Une exposition au musée d'Art moderne de Troyes présente pour la première fois l'intégralité du mobilier restauré après sa découverte en 2015 dans la tombe de Lavau. Si l'identité de l'unique défunt qui occupait ce vaste monument funéraire reste inconnue, les somptueux objets qui l'entouraient témoignent de son statut très élevé dans la société celte du Ve siècle avant notre ère.

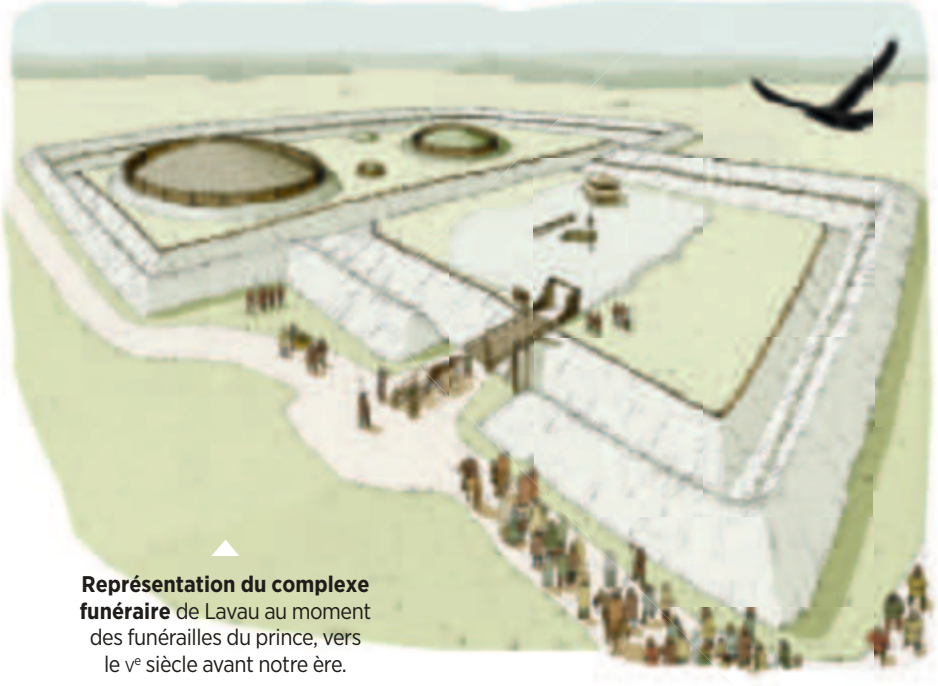
Par Marine Benoit

Dix ans se sont écoulés depuis la découverte fortuite par une équipe d'archéologues de l'Institut de recherches archéologiques préventives (Inrap), en bordure du chantier d'un rond-point de la ville de Lavau (Aube), de ce qui est incontestablement l'un des plus grands trésors sortis de terre dans l'Hexagone au XXIe siècle. Dix ans d'analyses, de rédaction d'études ou encore de minutieuses restaurations auront permis d'en savoir plus sur l'occupant et le riche mobilier de la tombe de Lavau qui, malgré son nom, n'a rien d'une simple sépulture. Édifié au milieu du Ve siècle avant notre ère près de l'actuelle ville de Troyes, dans une nécropole occupée depuis la fin de l'âge du bronze (vers le XIIe siècle avant notre ère), ce monument funéraire renfermait un seul défunt, qui fut à l'époque immédiatement identifié par les chercheurs comme un personnage de très haut rang. Et pour cause : unique en son genre, le monument était composé d'un vaste enclos quadrangulaire et d'un portique monumental donnant accès à la tombe par une rampe, le dispositif étant scellé par un tumulus de plus de 8 mètres de haut. En son centre, le mort était inhumé sur un char à deux roues, confirmant son statut d'élite.

L'état de conservation du squelette n'avait en revanche pas permis de déterminer son sexe avec certitude, laissant en suspens des questions : s'agissait-il bien d'un prince, comme soupçonné, et avait-il un lien de parenté avec la princesse celte de Vix *(lire l'encadré p. 82)*, dont l'extraordinaire sépulture datée du VIe siècle avant notre ère avait été mise au jour en 1953 à seulement une soixantaine de kilomètres ?

DENIS GLIKSMAN - INRAP - FRANÇOIS GAUCHET-INRAP

Les restes du prince celte découverts en 2015 ainsi que divers objets présents dans la tombe (en bas, le chaudron).



Représentation du complexe funéraire de Lavau au moment des funérailles du prince, vers le Ve siècle avant notre ère.

Aujourd'hui, alors qu'une exposition au musée d'Art moderne de Troyes présente pour la première fois, à partir du 24 janvier, l'intégralité du mobilier restauré, nous en savons bien plus sur ce personnage : il s'agit bien d'un prince qui appartenait aux fascinantes élites celtiques du premier âge du fer (VIIIe-Ve siècle avant notre ère). Âgé d'environ 30 ans au moment de son décès — un âge légèrement inférieur aux suppositions faites au moment de la découverte —, il semble avoir grandi et évolué dans un milieu extrêmement privilégié, ainsi que l'a montré sa dentition dans un état de santé et de conservation exceptionnel. *« Je dois avouer avoir rarement vu dans ma carrière des dents aussi saines. Il n'a aucune carie, aucun abcès, ni même de tartre. C'est très surprenant »*, s'est étonnée Valérie Delattre, archéoanthropologue qui a mené les analyses sur les ossements. Cette dernière a également pu établir que l'homme portait les séquelles d'une fracture mal reconsolidée à la clavicule, conséquence d'un violent choc *« typique des chutes de vélo de nos jours »*. *« On est donc forcément tentés de faire le lien avec une chute de char ou de cheval survenue dans son plus jeune âge »*, poursuit l'anthropologue. Enfin, la multiplication des prélèvements, notamment au niveau de l'abdomen, a permis de conclure que le défunt avait été éviscéré après sa mort, et ce dans le cadre d'un traitement soigneux lié à son statut particulier. *« Même si l'on ne peut pas parler de momification ou d'embaumement, que ses contemporains maîtrisaient depuis bien longtemps dans le monde grec ou égyptien, on peut supposer que son corps a fait l'objet d'une préparation spéciale avec des aromates, des onguents et autres mixtures. »*

C2RMF

« Le monde du prince de Lavau était profondément influencé par la culture méditerranéenne »

Benoît Mille, archéométallurgiste au Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF)

Des funérailles au caractère exceptionnel

Pour les chercheurs, il ne fait aucun doute que ses funérailles ont été un événement exceptionnel en raison de son prestige dans cette société de la fin de la période du Hallstatt (soit de la fin du premier âge du fer). *« Elles ont sans doute été organisées dans un laps de temps relativement long après son décès, ce qui aurait nécessité une bonne conservation des tissus mous du corps pour sa présentation publique »*, affirme Bastien Dubuis, responsable scientifique de la fouille. Il est en tout cas confirmé aujourd'hui que le prince a été enterré allongé dans son char *« sur un matelas d'herbes odoriférantes et fongicides »*. Cette dernière décennie aura aussi bien sûr permis de faire parler les objets

Trouvée à l'intérieur du chaudron, cette cuillère perforée (or et argent) dont le manche se termine par une main.

RENAUD BERNADET - INRAP - ANNE MAIGRET/C2RMF X 2

Une des quatre têtes du dieu fluvial grec Achéloos ornant le chaudron.

époustouflants qui accompagnaient ce dirigeant. Il y a bien sûr ce chaudron en bronze — ou lébès — aux larges proportions, qui sera incontestablement la star de l'exposition. Suspendu lors de banquets ou de cérémonies, *« il pouvait contenir jusqu'à 200 litres de liquide »*, assure Benoît Mille, archéo-métallurgiste chargé de son analyse. En l'occurrence, ici, du vin rouge aromatisé, à interpréter comme une boisson « civilisée » venue du monde méditerranéen. La seule restauration de ce chaudron aura nécessité près de 700 heures de travail tant celui-ci est délicat. Son affaissement et ses parties manquantes n'ont néanmoins pas su altérer sa beauté, que l'on doit largement à ses poignées ornées de têtes de petits dieux barbus et cornus — Achéloos, « dieu-fleuve » chez les Grecs. *« C'est peu dire que le monde du prince de Lavau était profondément influencé par la culture méditerranéenne, notamment la pratique grecque du symposion, c'est-à-dire la consommation de vin rouge de façon ritualisée »*, poursuit Benoît Mille. Car il y a aussi cette splendide œnochoé

Cette œnochoé (pichet à vin), sur laquelle est représenté Dionysos, atteste des échanges entre mondes grec et celte.

RENAUD BERNADET - INRAP

(une petite cruche qui servait à puiser le vin et à le distribuer) à figures noires quasi unique en son genre : venue là encore du monde grec, celle-ci a été « customisée » par ces Celtes avec de l'or. *« C'est un objet tout à fait singulier et vraiment propre à cette région charnière entre les mondes "barbares" et méditerranéens,* explique Bastien Dubuis. *On en connaît seulement deux autres exemplaires, trouvés dans la tombe de Vix, mais dans un mauvais état de conservation. »* L'œnochoé de Lavau, à présent restaurée, semble, elle, sortir de l'atelier. Décorée sur sa face d'une scène dont le personnage central est Dionysos, elle contenait là encore du vin aromatisé, dont il reste encore aujourd'hui un dépôt conséquent au fond. *« De telles pièces sont rarissimes en contexte celtique. Certaines pourraient être le fruit d'un artisanat de cour qui aurait mêlé les techniques et les répertoires stylistiques celtiques et méditerranéens »*, avance le chercheur.

Le torque, les deux bracelets et les fibules en or, intacts, auraient de leur côté été

C2RMF-VANESSA FOURNIER

Le torque en or, un des bijoux qu'arborait le prince (ici en cours de restauration), pèse plus de 500 g.

C2RMF-VANESSA FOURNIER

Des décors en or ont été ajoutés par les Celtes à l'œnochoé d'origine grecque (ici le pied en cours de restauration).

SÉPULTURE CELTE

Un lien de parenté avec la princesse de Vix ?

Durant l'hiver 1953, au milieu d'un champ bourguignon, près des sources de la Seine, un professeur et un ouvrier agricole font surgir de la boue une vaste sépulture où gît une femme, inhumée vers 500 avant notre ère. Étendue sur un char, richement parée, notamment d'un torque en or, de fibules en bronze décorées d'or, de corail et d'ambre, elle reposait aux côtés d'un gigantesque cratère grec haut de 1,64 mètre — le plus grand vase de bronze de toute l'Antiquité. On surnomma la « dame de Vix » cette princesse celtique, dont la tombe fut considérée — jusqu'à la découverte de Lavau — comme la plus fabuleuse trouvaille archéologique celtique du XX^e siècle en France. Hélas, sa fouille fut bâclée, et nombre d'informations disparurent à jamais après le réenfouissement hâtif de la sépulture. Même les objets sortis de terre et immédiatement placés dans un musée furent involontairement malmenés : l'intérieur du fameux vase, littéralement décapé, ne conserve par exemple aucune trace de la boisson qui s'y trouvait. Pour tenter de sauver ce qui pouvait encore l'être, l'Inrap décida de rouvrir la tombe 66 ans plus tard, en 2019. Mais même si les chercheurs parvinrent à glaner d'importantes nouvelles données, la découverte de la tombe de Lavau, semblable en de nombreux points à celle de Vix, fut sans doute la plus grande avancée dans la compréhension de ce monument exceptionnel.

fabriqués localement. Tout comme cette époustouflante petite passoire à vin en or et en argent, *« un métal encore plus rare et précieux que l'or à cette époque »*, précise Bastien Dubuis. Cette cuillère perforée de minuscules trous et d'une petite main en argent servait peut-être à extraire les dépôts gênants du vin au moment de sa dégustation. Ou encore ce pied de gobelet, toujours en argent, qui devait supporter un contenant en bois précieux.

Plus de 50 techniques d'examen employées par les chercheurs

Les recherches auront enfin permis de mieux comprendre le contexte historique dans lequel s'inscrivait ce tumulus, ou du moins d'en cerner les contours. *« Lavau occupait probablement une place privilégiée au sein d'un réseau de relations à longues distances. Avec Vix, ils apparaissent comme les pôles dominants de territoires organisés, de petits États émergents préfigurant les cités gauloises des siècles suivants »*, affirme Bastien Dubuis. Et même si les analyses ADN ont finalement démontré qu'il n'existait aucun lien de parenté entre la princesse de Vix et le prince de Lavau, *« il est difficile d'imaginer qu'ils n'aient pas partagé une même histoire »*.

Au total, plus de 50 techniques d'examen auront été employées par les chercheurs de l'Inrap et du Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF) pour faire parler la sépulture de Lavau. Parmi elles, l'utilisation d'un accélérateur de particules, la radiographie, la microscopie à balayage électronique ou encore la tomographie à rayons X. Un tout premier volume de la monographie de ce site d'exception, consacré spécifiquement au complexe funéraire monumental de Lavau (Gallia, 2024), a amorcé une importante série de publications scientifiques à venir. *« Le travail effectué ces dix dernières années est colossal, mais il est loin d'être achevé tant la tombe de Lavau est exceptionnelle,* conclut Bastien Dubuis. *Rendez-vous dans dix ans, donc. »* ■

THE GRANGER COLL. NY / AURIMAGES

Enterrement de victimes de la peste noire à Tournai (Belgique) en 1349, miniature tirée des « Chroniques et annales de Gilles le Muisit ».

Peste noire : la piste de l'accident climatique

L'analyse de cernes d'arbres anciens révèle que la pandémie meurtrière de peste qui ravagea l'Europe au Moyen Âge a été indirectement causée par une ou plusieurs éruptions volcaniques.

Avec ses 75 à 200 millions de morts, la peste noire de 1348 conserve depuis près de sept siècles son titre de pandémie la plus meurtrière de l'humanité. C'est donc en toute logique qu'elle est aussi, de nos jours, l'une des épidémies les plus étudiées par les historiens. De façon plus surprenante, elle recèle encore son lot de mystères, même si celui de son origine semble aujourd'hui avoir été résolu : en 2022, des travaux réalisés à partir de dents trouvées dans d'anciennes tombes confirmaient qu'elle trouvait son point de départ le plus plausible en Asie centrale, dans l'actuel Kirghizistan *(lire l'encadré p. 85)*. Mais une autre énigme vient aujourd'hui d'être résolue. Pour la première fois, des chercheurs de l'université de Cambridge (Royaume-Uni) et de l'Institut Léonine pour l'histoire et la culture de l'Europe de l'Est (GWZO), à Leipzig (Allemagne), ont cerné la raison pour laquelle cette épidémie a été si cataclysmique et s'est propagée si rapidement dans l'Europe médiévale. *« C'est quelque chose que je souhaite comprendre depuis longtemps,* a confié Ulf Büntgen, paléoclimatologue au département de géographie de Cambridge et coauteur de ces récents travaux. *Pourquoi cette pandémie s'est-elle produite*

à cet endroit et à ce moment précis de l'histoire européenne ? C'est une question très intéressante, mais personne n'a pu y répondre jusqu'ici. »

Les éruptions ont provoqué une forte baisse des températures

Grâce à des analyses dendrochronologiques croisées avec des informations collectées dans les archives historiques, l'équipe a pu mettre en évidence ce qui serait le premier rouage de la machine infernale, ou, selon l'expression employée par l'équipe, le *« tout premier domino à être tombé »* dans la série d'événements qui a conduit à la dévastation du Vieux Continent par la peste noire : une éruption volcanique — ou une série d'éruptions — survenue au cours de l'année 1345. Mais quel peut bien être le lien entre un tel phénomène géologique et la propagation sans précédent de la bactérie *Yersinia pestis* ? La réponse tient en un mot : le climat. Ulf Büntgen et son coauteur Martin Bauch, historien du climat et de l'épidémiologie médiévale à l'Institut Léonine, ont pu déterminer dans les cernes d'arbres de forêts des Pyrénées qu'entre 1345 et 1347, durant trois années consécutives, la ou les éruptions ont provoqué une baisse drastique des températures, en raison du brouillard causé par les cendres et les gaz volcaniques. Les étés 1345, 1346 et 1347 correspondaient à des « anneaux bleus », un type particulier de cerne qui se forme sous l'effet d'un coup de gel précoce ou d'un refroidissement brutal en fin de saison. *« Le froid bloque la dernière étape de formation du bois, appelée la lignification,* expliquent les chercheurs. *Et ces étés-là ont été particulièrement froids et humides. Si une seule année froide n'est pas rare, des étés froids consécutifs sont très inhabituels.* » De fait, la catastrophe volcanique a dû être suffisamment massive pour empêcher le soleil de réchauffer la surface de la Terre.

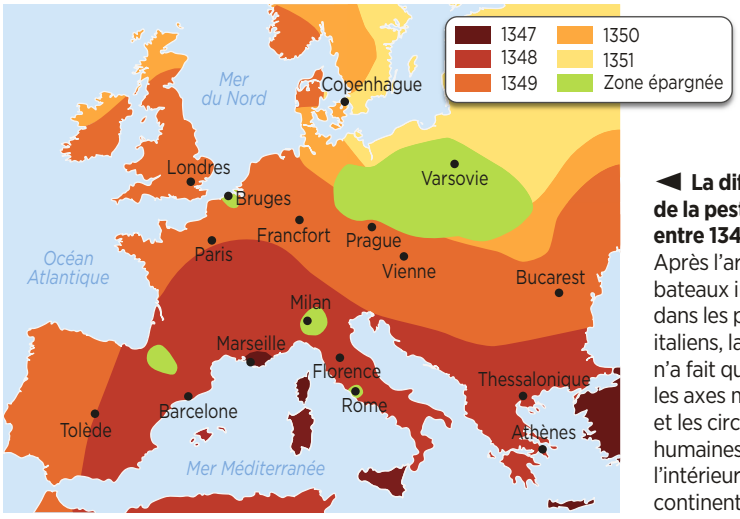
MUSEUM OF LONDON ARCHAEOLOGY/PA-PA MEDIA

En cinq à sept ans, « Yersinia pestis » s'est répandue à travers l'Europe (ici, squelettes de victimes découverts à Londres, au Royaume-Uni).

De leur côté, les sources écrites de l'époque font état d'une nébulosité inhabituelle et d'éclipses lunaires sombres, des phénomènes qui, là encore, suggèrent une activité volcanique intense. Martin Bauch explique que *« si les éruptions elles-mêmes étaient connues, elles n'avaient suscité jusqu'ici que peu d'intérêt »*. À vrai dire, il n'est même pas possible à ce jour de les localiser avec précision. *« Des carottes de glace nous permettent seulement de dire que l'éruption (ou les éruptions) s'est produite sous les tropiques, rien de plus. »*

Des navires infestés de puces porteuses de la bactérie

Et voici comment, à des milliers de kilomètres de l'Europe, l'activité d'un volcan a engendré la pire pandémie de l'histoire : ce refroidissement climatique a entraîné sur tout le pourtour méditerranéen de mauvaises récoltes, des pertes agricoles et un début de famine,



BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : ATLAS ZUR WELTGESCHICHTE

◀ La diffusion de la peste noire entre 1347 et 1351. Après l'arrivée des bateaux infestés dans les ports italiens, la bactérie n'a fait que suivre les axes marchands et les circulations humaines vers l'intérieur du continent.

contraignant les républiques maritimes italiennes de Venise, de Gênes et de Pise à importer en 1347 des céréales de l'empire mongol de la Horde d'or, autour de la mer d'Azov. *« Pendant plus d'un siècle, ces puissantes cités-États italiennes avaient établi des routes commerciales de longue distance à travers la Méditerranée et la mer Noire, ce qui leur permettait de mettre en place un système très efficace pour prévenir la famine,* explique l'historien. *Mais en fin de compte, même si ce changement de commerce céréalier a empêché une grande partie de l'Italie de mourir de faim, il a involontairement conduit à une catastrophe bien plus grave.* »

Et pour cause : les navires qui transportaient des céréales depuis la mer Noire étaient infestés par des puces porteuses de *Yersinia pestis*, comme l'ont déjà établi des recherches antérieures. La suite, nous la connaissons. Les puces transportant la bactérie *Yersinia pestis* dans leur intestin l'ont transmise en piquant les rats ou les rongeurs qui les véhiculaient, avant de piquer les humains quand les rats n'étaient plus en nombre suffisant. Ainsi, après l'arrivée des bateaux dans les ports italiens, la bactérie n'a fait que suivre les axes marchands et les autres circulations humaines vers l'intérieur. En quelques années — cinq à sept ans, estime-t-on aujourd'hui —, elle a fini par gagner l'Europe entière, jusqu'aux pays nordiques *(voir la carte ci-contre)*.

Les chercheurs soulignent que la vague de froid liée à l'activité volcanique de 1345 n'a toutefois pas uniquement touché le bassin de la Méditerranée. *« Elle a probablement sévi sur une grande partie de l'Europe occidentale et centrale ainsi que sur la Scandinavie, mais nous avons choisi de nous concentrer sur une région clairement définie »*, précise Martin Bauch. L'équipe a néanmoins pu démontrer que de nombreuses villes italiennes, même les grandes comme Milan et Rome, n'ont très probablement pas été touchées par la peste noire, apparemment parce qu'elles n'avaient pas eu besoin d'importer des céréales après 1345. De quoi laisser entendre que le lien entre le climat, la famine et les importations de céréales pourrait expliquer d'autres vagues de peste. *« Les pandémies ne sont pas uniquement dues à des agents pathogènes, mais à des systèmes socio-écologiques complexes : les réseaux commerciaux, les structures politiques et les fluctuations climatiques jouent tous un rôle. Ils forment les nombreuses pièces d'un puzzle qui, prises ensemble, expliquent la séquence concrète des événements »*, assure l'historien.

Et même si la coïncidence des facteurs qui ont contribué à la peste noire semble *« rare »*, pour les chercheurs, *« la probabilité que des maladies zoonotiques apparaissent dans le contexte du changement climatique et se transforment en pandémies est susceptible d'augmenter dans un monde globalisé »*. La pandémie de Covid-19 est encore suffisamment vive dans les mémoires pour nous le rappeler. ■ **Marine Benoit**

ÉMERGENCE

Au Kirghizistan, berceau de la peste

En 2022, l'analyse ADN de dents trouvées dans les tombes d'un ancien cimetière de la vallée de Tchouï, dans la région du Tian Shan (Kirghizistan), a enfin permis de déterminer le lieu d'émergence de la bactérie *Yersinia pestis*, huit ans avant qu'elle ne décime la moitié de l'Europe. Non seulement les inscriptions en syriaque (une ancienne langue orientale) sur les pierres tombales attestaient d'un nombre disproportionné de sépultures datées de 1338 et 1339 mentionnant une *« pestilence »*, mais les restes trouvés contenaient de l'ADN correspondant à *Yersinia pestis*. La bactérie qui causa la perte de ces anciens Kirghizes n'était toutefois pas la même : son génome se situait sur un nœud précédant immédiatement le fameux « Big Bang », du nom donné à la naissance de quatre souches bactériennes distinctes à partir de la souche initiale de *Yersinia Pestis*. Dans le Tian Shan, ce ne sont pas les rats qui sont suspectés d'avoir transporté la maladie, comme ce fut le cas en Europe, mais les marmottes, très répandues dans cette région montagneuse. Reste à comprendre pourquoi seule l'une des quatre branches issues du « Big Bang » a voyagé jusqu'en Eurasie occidentale pour causer le cataclysme que nous connaissons.

GWZO

« Les pandémies ne sont pas uniquement dues à des agents pathogènes, mais à des systèmes socio-écologiques complexes »

Martin Bauch, historien du climat et de l'épidémiologie médiévale à l'Institut Léonine pour l'histoire et la culture de l'Europe de l'Est, en Allemagne

Thomas Harriot à la conquête d'un nouveau monde

Moins connu que Galilée, le savant anglais Thomas Harriot (1560-1621) a pourtant contribué fortement au développement de l'astronomie et des mathématiques. Sa fascination pour la mer l'a même conduit à explorer les côtes américaines et à améliorer les techniques de navigation et de cartographie.

Par Pascal Brioist

Thomas Harriot a parfois été nommé le Galilée ou le Kepler anglais en raison de ses intérêts astronomiques mais, un siècle après Léonard de Vinci, il incarne en réalité magnifiquement le polymathe de la Renaissance. Né en 1560 et issu d'un milieu modeste de la ville d'Oxford, il put entrer au collège de St Mary's Hall en 1577. L'université était alors très favorable aux études scientifiques. Au XIVe siècle, les logiciens du Merton College y avaient développé des études mathématiques sur la physique du mouvement. Le fruit essentiel de leur travail est l'application de la théorie euclidienne des proportions à la comparaison des mouvements variés, par l'intermédiaire de diagrammes. Ce *calculus* aboutit à la détermination de la vitesse moyenne d'un mouvement uniformément varié et, par conséquent, à la comparaison des effets de deux mouvements uniformément variés — un calcul nécessaire à la compréhension de la chute des corps.

Thomas Harriot a-t-il été formé à ces questions ? On ne peut le prouver mais, plus tard dans sa vie, ces enjeux le passionnèrent. Dans les années 1570, en tout cas, des enseignants de St Mary's Hall, comme le révérend Richard Hakluyt, promeuvent les récits de voyages transocéaniques

P. MATSAS/OPALE/LEEXTRA

Professeur d'histoire à l'université de Tours, Pascal Brioist est membre du Centre d'études supérieures de la Renaissance.

d'Humphrey Gilbert et de Francis Drake ainsi que la cartographie nouvelle inspirée des travaux du mathématicien John Dee. C'est probablement par le biais de Richard Hakluyt que Thomas Harriot, brillant mathématicien, trouve au début de l'année 1583 un emploi auprès de sir Walter Raleigh. Ce tumultueux favori de la reine Elizabeth 1re souhaitait bâtir pour sa souveraine un empire colonial tourné vers le Nouveau Monde. Dans la tour de Durham House, l'hôtel particulier de Walter Raleigh, Thomas Harriot écrit ainsi en 1584 l'*Arcticon*, un traité de navigation sous les hautes latitudes, et observe les étoiles depuis le toit avec une lunette astronomique. Il manipule aussi des instruments de navigation comme la boussole, l'astrolabe et le bâton de Jacob, qui lui permettent de mesurer la hauteur du Soleil ou de l'étoile Polaire au-dessus de l'horizon et d'avoir ainsi en mer une idée approximative de la latitude.

La fascination pour la mer conduit Thomas Harriot à embarquer en 1585 pour de nouveaux horizons. À bord d'un vaisseau de Walter Raleigh, le *Tyger*, il prend part à une expédition constituée de sept navires pour la côte de ce qui s'appellera plus tard la Virginie. Il est accompagné du dessinateur John White, bien décidé à saisir l'image

AKG IMAGES

« L'arrivée des Anglais en Virginie », gravure (d'après un dessin de John White) illustrant le récit de voyage publié en 1590 par Thomas Harriot (ci-dessous son portrait présumé en 1602).

SPL/AKG IMAGES

de l'Amérique, de ses plantes, de ses animaux et de ses habitants. Il trompe l'ennui de la longue traversée en prenant des notes sur la technologie des cordages et des voiles ainsi que sur le vocabulaire imagé des marins. Arrivé sur l'île de Roanoke, Thomas Harriot observe les habitudes des Algonquins et s'engage dans la composition d'un dictionnaire en phonétique pour échanger avec eux. Un an plus tard, il profite du passage de la flotte de sir Francis Drake pour revenir à Londres, laissant la colonie à un triste destin puisqu'elle disparaîtra après l'hiver suivant.

Des hypothèses mathématiques sur la nature des arcs-en-ciel

En juillet 1586, le savant entreprend d'améliorer sa cartographie et les courbes loxodromiques (trajectoire suivie par un navire qui garde un cap constant) pour naviguer sur le globe par la science des triangles nautiques. Son approche trigonométrique est l'occasion pour lui de renouer avec les mathématiques et l'algèbre avant d'écrire son *Brief and True Report of the New Found land of Virginia* (Récit bref et véridique de la nouvelle terre de Virginie) pour rapporter son expérience américaine, non seulement à Raleigh et ses pilotes, mais aussi au public anglais susceptible d'investir dans l'aventure transatlantique. La guerre avec l'Espagne, qui envoie son Invincible Armada en 1588, retarde ces projets. Entre-temps, Thomas Harriot se tourne vers l'exploitation des terres de Walter Raleigh en Irlande et le perfectionnement de tables de navigation par l'observation astronomique.

Vers 1591, Thomas Harriot se met au service d'un ami de Walter Raleigh, Henry Percy, 9e comte de Northumberland, un jeune homme passionné de sciences et de jeux de cartes connu sous le surnom de comte Sorcier. À cette époque, Walter Raleigh n'était plus en mesure de subvenir aux besoins de son mathématicien car le chevalier avait été envoyé par la reine à la Tour de Londres en raison de son mariage secret avec une demoiselle d'honneur de la souveraine. En 1592-1593, Walter Raleigh et Thomas Harriot pâtissaient d'une terrible réputation car un pamphlet jésuite soutenait que les deux hommes et le comte de Northumberland formaient une école d'athéisme, dite école de la nuit. L'accusation contre les conjurateurs n'était peut-être pas sans fondement étant donné leur pensée fort libre sur la notion d'âme immortelle, sur l'atomisme ainsi que leur goût

pour la spéculation intellectuelle en général, mais elle était largement exagérée. Un procès contre Walter Raleigh, dans le Dorset, blanchit en tout cas le groupe de la périlleuse mise en cause.

Thomas Harriot décide ensuite de se concentrer surtout sur les mathématiques et la physique. Le comte de Northumberland l'invite alors à résider dans son palais non loin de Londres : Syon House. Il y bénéficie d'un laboratoire d'alchimie et d'optique, d'une riche bibliothèque tenue par le médecin Walter Warner et de la compagnie de jeunes savants comme Richard Hues, fabricant de globes terrestres, de Nicholas Hill, atomiste convaincu, et de sir Thomas Aylesbury, féru comme lui d'astronomie. Les ressources intellectuelles d'un tel cercle profitent grandement aux recherches de Thomas Harriot. Dans le domaine de l'optique, il poursuit l'étude de la réflexion et de la réfraction de la lumière dans divers milieux (air, eau, huile…) à partir des écrits de Ptolémée et d'Ibn Al Haytham. Il est l'un des premiers à donner les formules des angles d'incidence et de réfraction de la lumière, qu'il vérifie par des expériences et des calculs. Avec des prismes, il diffracte la lumière et formule des hypothèses mathématiques sur la nature des arcs-en-ciel.

Thomas Harriot est également passionné par l'algèbre, qui lui fournit un instrument redoutable pour étudier les phénomènes physiques. Il invente ses propres symboles et abréviations pour écrire ses équations : les indices pour les puissances, les signes d'inégalité, la lettre « *n* » là où nous écrivons « *x* », etc. Il s'inspire beaucoup ici des livres du moine Michael Stifel et de l'algébriste François Viète, présents dans la bibliothèque du comte. Il résout des équations du deuxième et du troisième degré et jongle avec variables et paramètres. Il sait réduire quantité de polynômes et étudie la théorie des nombres, notamment ce qu'il appelle les nombres triangulaires, ou encore les notions de probabilité. Tout se trouve résumé dans son *Artis Analyticae Praxis* publié de façon posthume. Il invente aussi une écriture en base 2 à partir de 0 et de 1 pour remplacer le système décimal. Il poursuit aussi des recherches en géométrie. C'est ainsi qu'il s'intéresse aux coniques, en particulier à la géométrie des paraboles et des hyperboles.

LORD EGREMONT/GALAXY

Un des nombreux dessins de taches solaires réalisés par Thomas Harriot à partir de ses observations du ciel avec une lunette astronomique « primitive ».

Un observateur de la Lune, des satellites de Jupiter et des comètes

Dans le domaine de l'astronomie, et grâce à des lunettes astronomiques qu'il nomme « *troncs optiques* », il observe la Lune et ses mers, les satellites de Jupiter, dont il prouve le mouvement autour de la planète géante en même temps que Galilée. Il observe également les comètes dont il juge qu'elles appartiennent bien au monde céleste et non au monde sublunaire aristotélicien décrit dans les *Météores*.

La fin de vie de Thomas Harriot fut toutefois assez difficile, d'abord parce que ses protecteurs connurent des déboires politiques. Le comte de Northumberland, impliqué dans la conspiration des poudres, sera emprisonné de 1605 à 1621 à la Tour de Londres et Walter Raleigh, également accusé d'avoir participé à la conspiration contre le roi Jacques I^{er} puis soupçonné de complicité avec l'Espagne après une aventure ratée en Guyane à la recherche de l'Eldorado, connaîtra le même sort. Thomas Harriot essaya d'aider Henry Percy, lourdement imposé, en chassant ses créditeurs au moyen de la loi mathématique des intérêts composés, et apporta son soutien à Walter Raleigh, plongé dans l'écriture d'une très savante *Histoire du Monde,* en étudiant pour lui l'histoire des religions. Las, ce dernier mourut sous la hache du bourreau en 1618, et le tabac rapporté du Nouveau Monde que le mathématicien s'était mis à priser lui occasionna un cancer de la cloison nasale et une mort extrêmement douloureuse. ■

APPLICATIONS

Les sciences au service de la guerre

L'approche scientifique de Thomas Harriot n'était pas purement théorique. Travaillant au service d'un riche mécène passionné par la guerre, il se lance dans des recherches sur la balistique et résout une énigme posée par le mathématicien italien Tartaglia : comment traiter mathématiquement de la puissance d'un boulet de canon en se servant de la science médiévale des *calculatores* ? En même temps que Galilée, et partant des mêmes prolégomènes que lui, il mathématise ainsi la théorie de la chute des corps et soupçonne en 1610 une accélération des corps en chute libre observant la loi des carrés. Il étudie également la géométrie des fortifications modernes et même les calculs de la mise de bataillons au carré. Il suggère aussi que ce qu'il a appris des coniques peut lui fournir des solutions pour la construction navale des galions corsaires et pour le dimensionnement de leurs mâts. Plus prosaïquement encore, sa compréhension de l'hydraulique et de sa physique l'amène à proposer des moyens pour résoudre les problèmes de plomberie du château de Syon House, propriété des comtes de Northumberland.

REJOIGNEZ **LE PREMIER PÔLE SCIENTIFIQUE** DE LA PRESSE FRANÇAISE

SCIENCES ET AVENIR

LE MENSUEL

LE HORS-SÉRIE

UNE INFORMATION THÉMATIQUE CLAIRE ET VIVANTE

Chaque trimestre, une thématique étudiée sous tous ses aspects, en compagnie des plus grands spécialistes.

39 JOURNALISTES PASSIONNÉS

19 PARUTIONS PAR AN

4,6 MILLIONS DE LECTEURS

2,6 MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

2,7 MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

3 APPLICATIONS IOS/ANDROID

UNE VISION COMPLÈTE DE LA SCIENCE

Chaque mois, toute l'actualité scientifique, dans un langage accessible.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur sciencesetavenir.fr

La Recherche

LE TRIMESTRIEL

LA RÉFÉRENCE INCONTOURNABLE

Chaque trimestre, un panorama complet en 150 pages de la recherche scientifique.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur larecherche.fr

2 SITES POUR DES INFOS EXCLUSIVES

TOUTE L'ACTUALITE SCIENTIFIQUE QUOTIDIENNE

2 sites au service de l'actualité scientifique, de la plus accessible à la plus innovante. **Des articles quotidiens** pour être à la pointe de la science.

Vos questions en direct aux chercheurs sur notre chaîne Twitch https://www.twitch.tv/sciencesetavenir/

plus de 2 millions de fans !

plus de 303 000 followers

plus de 165 000 instagrammeurs

Plus de 67 000 abonnés professionnels

plus de 23 000 abonnés

PROMINT-SCAV2

RENDEZ-VOUS

SOMMAIRE

▶ C'est à lire
p. 90

▶ C'est à voir
p. 92

▶ Questions de lecteurs
p. 94

▶ Courrier
p. 95

▶ Le ciel du mois
p. 96

▶ À retrouver sur notre site
p. 98

KHANHREN AUD/ABACAPRESS.COM

Reid Hoffman, cofondateur de LinkedIn, lors d'une conférence sur l'IA, à Paris fin 2024.

Dans la tête des rois de l'IA

L'auteur de « Pionniers » va à la rencontre des dirigeants et entrepreneurs derrière les projets technologiques les plus en vue ces dernières années.

VISIONS L'actualité des technologies est saturée de modèles de langage, de *deep learning*, de ChatGPT, d'histoires d'algorithmes ou de paramètres. Mais qui se trouve derrière, qui sont ces gens prophétisant un avenir radieux régi par une intelligence artificielle ubiquitaire ? Rédacteur en chef tech et sciences au magazine *Le Point*, l'auteur les a rencontrés pour tenter de les sonder et de nous laisser entrevoir leur manière de penser, leurs motivations, leurs mentors et leurs inspirations. Loin d'être une série de biographies ou de CV améliorés, ce livre — dont le titre fait un peu contresens tant il n'est justement pas question de pionniers de l'IA — propose des instantanés de Mark Zuckerberg (Meta), Demis Hassabis (Google Deepmind) ou Meredith Whitaker (Signal).

Si tous s'avèrent animés d'une foi dans la technologie, si tous partagent un esprit *geek* et l'amour des échecs, les personnalités et visions du monde sont très variables, entre un Dario Amodei (Anthropic) catastrophiste, un Reid Hoffman (LinkedIn) nuancé ou un Mark Zuckerberg exalté au point de sembler manquer de direction dans ses aspirations. Même une Meredith Whitaker et un Pavel Durov (Telegram) semblent situés à des années-lumière l'une de l'autre malgré leurs projets similaires. Jusqu'au portrait détonnant d'Alex Karp, disciple du philosophe allemand Jürgen Habermas, parti d'idéaux de gauche pour promouvoir aujourd'hui, à la tête de Palantir, une vision militariste de toute technologie, méprisant le *« nihilisme superficiel »* d'un Google. ■

Arnaud Devillard

Pionniers. Voyage aux frontières de l'intelligence artificielle, Guillaume Grallet, Grasset, 288 p., 22 €

La parité aussi dans l'espace

HÉROÏNES Au moment où l'Américaine Christina Koch s'apprête à devenir la première femme à réaliser un vol en orbite lunaire (*lire le dossier p. 28*), ce livre retrace le rôle croissant des astronautes féminines. De la Soviétique Valentina Terechkova — première femme à réaliser un vol dans l'espace en 1963 — à la taïkonaute Liu Yang en passant par les Françaises Claudie Haigneré et Sophie Adenot, l'auteur raconte l'histoire de ces héroïnes et les difficultés bravées pour prendre leur place aux côtés de leurs homologues masculins. ■ **F. D.**

Une femme sur la Lune, Charles Frankel, Dunod, 199 p., 16,90 €

Femmes des cavernes

GENRE Alors que les femmes ont longtemps été invisibles pour la préhistoire, Anne Augereau nous propose un voyage de 300 000 ans en Europe et au Proche-Orient pour explorer l'évolution de la condition féminine, de la naissance à la mort. S'appuyant sur une analyse matérielle du genre (postures corporelles, objets, vêtements, alimentation, travail, pratiques funéraires…) et une rigoureuse méthodologie, elle établit que *« la domination masculine plonge ses racines dans le temps long »*, mais que *« d'autres schémas ont certainement coexisté »*. Une contribution importante à l'archéologie du genre. ■ **S. H.**

Une préhistoire des femmes, Anne Augereau, La Découverte, 416 p., 27 €. Parution le 19 février.

Le vrai visage des Vikings

ÉCLAIRAGE Le 8 juin 793, un petit groupe de Vikings pillèrent le monastère de l'île de Lindisfarne (Royaume-Uni), jetant l'effroi dans toute la chrétienté occidentale. La réputation de violence débridée de ces aventuriers des mers infuse aujourd'hui encore l'imaginaire populaire. Au-delà de ces représentations, l'historien Stéphane Coviaux s'appuie dans cet ouvrage richement illustré sur les dernières connaissances pour décrire l'influence du peuple viking sur l'Europe médiévale de la fin du premier millénaire. ■ **S. R.**

Le Grand Atlas des Vikings, Stéphane Coviaux, Glénat, 224 p., 39,95 €

La paternité au crible de la science

IDÉES REÇUES Le temps d'exposition des hommes aux bébés modifie-t-il leur cerveau ? C'est la question qui a longtemps titillé Sarah Blaffer Hrdy, primatologue et anthropologue évolutionniste. La science de l'évolution a entériné comme allant de soi les rôles et la division du travail des sexes : aux mâles, la rivalité pour accroître leur statut, le nombre de leurs partenaires ; aux femelles, la gestation, l'allaitement et les soins de la progéniture du vainqueur. Selon Sarah Blaffer Hrdy, qui a réétudié la question sous tous ses angles — génétiques, endocriniens, neurologiques —, *« les hommes ont plutôt permis à leur potentiel biologique latent de s'exprimer »*. Des imageries récentes ont en effet montré que leur cerveau réagissait comme celui d'une mère venant d'enfanter. Une étude sur des milliers de pères philippins qui gardaient leurs petits tandis que les mères allaient travailler à l'étranger pointait que leur taux de testostérone baissait, etc. Une claque aux idées reçues. ■ **Rachel Fléaux**

Le Temps des pères, Sarah Blaffer Hrdy, La Découverte, 452 p., 26 €

Terre en péril

ANTHROPOCÈNE *Homo sapiens* a modifié notre planète en profondeur, éradiquant la grande faune, déforestant de vastes étendues. Pour soutenir nos industries polluantes, nos sociétés sont devenues de plus en plus extractives, quitte à détruire notre environnement. Ainsi, pour obtenir 100 g de terres rares nécessaires à nos smartphones, il faut réduire en poussière une tonne de roche ! Ce livre enrichi de cartes et infographies montre comment les interactions entre activités humaines et cycles naturels conditionnent la survie de l'humanité. ■ **S. R.**

Notre empreinte sur Terre, Laurent Testot, Perrin Remonté, Armand Colin, 160 p., 26,90 €

La beauté des maths

HOMMAGE Mathématicien de renommée internationale, médaille Fields 2010, Cédric Villani aime transmettre sa passion au grand public. L'ouvrage rassemble une série de conférences données ces dernières années, où il s'attache à montrer la diversité et la beauté des mathématiques. Il use pour cela d'anecdotes historiques, d'illustrations, de récits tirés de ses expériences… et de formules mathématiques absconses, mais dans lesquelles on finit pour trouver une certaine beauté. L'un des passages les plus passionnants est consacré à Henri Poincaré et Ludwig Boltzmann. Ce n'est pas un hasard : physique statistique et thermodynamique sont au centre du travail de Villani. En faisant dialoguer Poincaré et Boltzmann, l'auteur rappelle que les mathématiques éclairent des notions aussi intrigantes que la flèche du temps, ou l'imprédictibilité de systèmes pourtant soumis à des lois déterministes. De quoi prodiguer, en effet, une certaine joie aux lecteurs. ■ **Fabrice Nicot**

Leçons de mathématique joyeuse, Cédric Villani, Le Cherche-Midi, 21 €

▶ **Ce symbole désigne les nouvelles expositions**

EXPOSITIONS

Bordeaux (33)

▶ **Orang-Hutan, l'homme de la forêt**
Besar, un orang-outan de Bornéo naturalisé, est au centre d'une installation artistique. Huit grandes photographies documentent la destruction de l'habitat naturel de ces grands primates.
Muséum, 5, place Bardineau, jusqu'au 28 février. Rens. : 05.24.57.65.30.

Grenoble (38)

TERCEL
Cette exposition (« Terre et cellulose ») traite de la transformation de déchets industriels et de matériaux biosourcés en éléments de construction (claustras, faux plafonds), prototypes à l'appui.
La Casemate, 2, place Saint-Laurent, jusqu'au 28 mars. Rens. : lacasemate.fr

La Rochelle (17)

▶ **Corail**
Une série d'images sur les récifs coralliens des îles d'Hatamin et de Seraya en Indonésie, par le photographe et biologiste marin Martin Colognoli. Elles révèlent le travail des pêcheurs locaux pour la préservation de cet écosystème.
Muséum d'Histoire naturelle, 28, rue Albert-1er, jusqu'au 20 septembre. Rens. : 05.46.41.18.25.

Le Havre (76)

▶ **Muséum d'Histoire naturelle**
Après trois ans de travaux, des espaces entièrement rénovés ont été inaugurés mi-décembre 2025. Le parcours d'exposition présente 600 spécimens.
Muséum d'Histoire naturelle, place du Vieux-Marché. Rens. : 02.35.41.37.28.

Lodève (34)

▶ **Un crocodile du jurassique**
Un fossile de crocodile marin unique en France, long de 5 mètres et quasi complet, est présenté pour la première fois au public. Vieux de 180 millions d'années, il a nécessité six mois de restauration.
Musée de Lodève, 1, place Francis-Morand, jusqu'au 15 mars. Rens. : 04.67.88.86.10.

Lyon (69)

▶ **Le trésor des bâtisseurs**
Cette nouvelle « expédition immersive » en réalité virtuelle fait découvrir le chantier de la pyramide de Kheops. Elle intègre les dernières découvertes scientifiques sur le sujet.
Lire notre reportage : sciav.fr/948kheops
Espace Eclipso, 112, cours Charlemagne. Rens. : 04.78.79.32.37.

Meaux (77)

▶ **Derrière les masques. Photographies des deux guerres**
Depuis la première attaque au gaz à Ypres en 1915 jusqu'à la fin de la Seconde Guerre mondiale, une rétrospective en photos de l'évolution du masque à gaz, devenu symbole des conflits modernes.
Musée de la Grande Guerre, rue Lazare-Ponticelli, jusqu'au 16 août. Rens. : 01.60.32.14.18.

Montbéliard (25)

Voyage en Nord
Ce parcours interactif en forme de voyage en voilier de La Rochelle au Groenland mêle techniques de

2025 THE M.C. ESCHER COMPANY, THE NETHERLANDS

« Jour et nuit », de Maurits Cornelis Escher, une gravure sur bois de 1938.

Paris (75) / Exposition

M.C. Escher

L'artiste néerlandais Maurits Cornelis Escher (1898-1972) a laissé une œuvre qui a imprégné l'imaginaire collectif. Pourtant, de son vivant, il a connu une gloire tardive. Cette rétrospective va de ses travaux paysagers des années 1920 et 1930 aux paradoxes géométriques qui ont fait sa renommée. *« Nous ne présentons pas seulement des œuvres, mais aussi beaucoup d'éléments didactiques, pédagogiques, émouvants et amusants pour faire comprendre cet univers unique, car M.C. Escher n'a pas de précédents ni d'artistes similaires qui l'ont suivi »*, explique Iole Siena, présidente de la société de production d'expositions Arthemisia.

Ce dessinateur et graveur a énormément joué avec la perspective à point de fuite unique, fort d'un dialogue fructueux avec les mathématiques et la cristallographie. Les perspectives se distordent, le haut et le bas permutent, le convexe est aussi concave… *« Il a trouvé une voie complètement nouvelle, puisqu'il est arrivé à faire dire à la perspective exactement le contraire de ce pour quoi elle était faite »*, estime Jean-Hubert Martin, historien de l'art et co-commissaire de l'exposition.
Lire notre reportage : sciav.fr/948escher ■ **Arnaud Devillard**

Monnaie de Paris, 11, quai de Conti, Paris, jusqu'au 1er mars. Rens. : sciav.fr/948monnaie

navigation à voile et sciences naturelles consacrées aux régions arctiques.
Pavillon des sciences, 5, impasse de la Presqu'île, jusqu'au 31 août. Rens. : 03.81.91.46.83.

Mouans-Sartoux (06)

▶ L'art extra-terrestre au XXIe siècle

Onze artistes présentent des œuvres inspirées de conditions spatiales uniques : apesanteur, micropesanteur, absence de pression atmosphérique. En partenariat avec le laboratoire culturel du Cnes.
Espace de l'Art concret, château de Mouans, jusqu'au 3 mai. Rens. : 04.93.75.71.50.

Paris (75)

Déserts

Prolongation de ce parcours sur les stratégies d'adaptation de la faune et de la flore dans les espaces arides, du Sahara à l'Antarctique.
Lire notre reportage : sciav.fr/948deserts
Muséum national d'histoire naturelle, Grande Galerie de l'évolution, 36, rue Geoffroy-Saint-Hilaire, jusqu'au 19 avril. Rens. : 01.40.79.56.01.

Dinosaures, l'expérience immersive

Un spectacle en sons et projections vidéo recréant le monde des créatures préhistoriques. La narration va de la naissance des dinosaures herbivores à la chasse nocturne des *T. rex*.
Lire notre reportage : sciav.fr/948dinos
Atelier des Lumières, 38, rue Saint-Maur, jusqu'au 8 mars. Rens. : www.atelier-lumieres.com

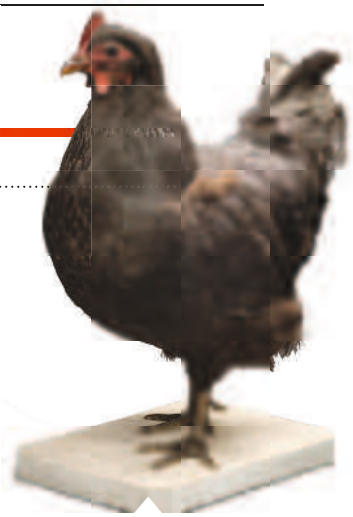
▶ Sous la surface, les maths

Comment représenter les surfaces en deux et trois dimensions grâce aux mathématiques ? Explorations des principes géométriques qui se cachent derrière la cartographie, l'infographie ou la modélisation numérique.
Maison Poincaré, 11, rue Pierre-et-Marie Curie, jusqu'au 21 mars. Rens. : sciav.fr/948maths

Toulouse (31) / Exposition

Domestique-moi si tu peux

Où en serait l'être humain s'il n'avait pas domestiqué plantes et animaux ? Réponses dans cet exposé des — très — différentes facettes du processus, défini par une modification génétique des individus et l'acquisition (ou la perte) de caractéristiques à la suite de plusieurs années de sélection. Outre les attendus chiens et chats, l'exposition fait la part belle au végétal, et aborde des aspects surprenants relatifs à la médecine, aux arts ou à la création de matériaux. D'ailleurs, le parcours débute au coin du feu car, bien avant que les loups ne deviennent des chiens, c'est par le feu que l'humain a commencé l'odyssée de la domestication.
Lire notre reportage : sciav.fr/948domestique ■ **Lou Chabani**
Muséum d'Histoire naturelle, 35, allée Jules-Guesde, jusqu'au 5 juillet. Rens. : 05.67.73.84.84.


DANIEL MARTIN, MUSEUM DE TOULOUSE

Orpington noire, poule domestique originaire d'Angleterre.

PARTENARIAT SCIENCES AVENIR

Grenoble (38)

iForum

Événement dédié aux acteurs locaux de l'innovation au sein du salon Tech&fest : projets en émergence dans les laboratoires, start-up, structures locales d'accompagnement, investisseurs...
Alpexpo, les 4 et 5 février. Rens. : sciav.fr/948iforum

Scannez ce QR code pour retrouver toutes les expositions

Une formidable diversité

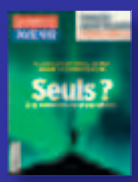
11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 939
Les nouvelles armes

N° 940
Comment Sapiens a conquis le monde

N° 941-942
Les 25 grandes découvertes

N° 943
Dossier spécial Alzheimer



N° 944 Seuls ?
À la recherche de la vie ailleurs

N° 945 La science peut-elle sauver le climat ?

N° 946 Les géniales "erreurs" d'Einstein

N° 947
Spécial Aux origines

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France). Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir - service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 939 ❑ N° 940 ❑ N° 941-942 ❑ N° 943
❑ N° 944 ❑ N° 945 ❑ N° 946 ❑ N° 947

Nom : .....
Adresse : ..... Ville : .....
.....
Code postal : .....

Posez vos questions sur la page **Facebook** de **Sciences et Avenir**

VICTOR HABBICK VISIONS / SPL / SUCRÉ SALÉ

Cette zone de l'Atlantique nourrit nombre de fantasmes et de théories depuis la première disparition d'avions (illustration).

OCÉANOGRAPHIE

Que dit la science des phénomènes qui se produisent dans le triangle des Bermudes ?

Ben N.

Depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, une portion de l'océan Atlantique située entre les Bermudes (Royaume-Uni), la Floride et Porto Rico (États-Unis) hante les esprits : le triangle des Bermudes. L'affaire éclate vraiment en 1945 avec la disparition du « vol 19 » : une escadrille de cinq avions de la marine américaine se perd en exercice, avant ce tout dernier appel radio : *« On dirait qu'on rentre dans des eaux troubles… Nous sommes complètement perdus. »* Aucun débris n'est retrouvé et 27 hommes disparaissent, alimentant la presse puis les récits les plus extravagants. En 1950, le quotidien américain *Miami Herald* décrit pour la première fois une zone triangulaire, et en 1964, un article du magazine américain *Argosy* popularise définitivement l'expression triangle des Bermudes. Une zone où avions et bateaux auraient tendance à disparaître…

Très vite, des explications fantaisistes émergent : interventions extraterrestres, vestiges de l'Atlantide ou encore portails vers d'autres dimensions… L'agence américaine d'observation océanique et atmosphérique (Noaa) a réexaminé les cas les plus célèbres et évoque plusieurs phénomènes naturels plausibles : des anomalies géomagnétiques pouvant perturber la navigation, ainsi qu'une météo violente associée à des courants complexes et à… l'erreur humaine.

En effet, la zone est régulièrement frappée par des tempêtes tropicales et des ouragans, tandis que le Gulf Stream peut changer subitement de vitesse ou de direction, déroutant même des équipages expérimentés. Concernant le vol 19, l'analyse de la Navy suggère qu'il pourrait s'agir d'une série de décisions malheureuses prises dans un contexte atmosphérique défavorable (ciel couvert et mer agitée). En particulier, une erreur de positionnement de la part de l'instructeur, qui croyait ses appareils au-dessus des Keys, en Floride, alors qu'ils dérivaient vers l'Atlantique.

Le triangle des Bermudes est-il vraiment plus dangereux qu'un autre lieu du globe ? La Noaa l'affirme : *« Rien ne prouve que les disparitions mystérieuses soient plus fréquentes dans le triangle des Bermudes que dans toute autre grande zone océanique très fréquentée. »* Le mythe doit davantage sa longévité à son aura médiatique qu'à un excès de phénomènes inexpliqués. ■ **Camille Gaubert**

ASTRONOMIE

Depuis la Terre, voit-on le centre ou les confins de la Voie lactée ?

Carline J.

Quand on admire la Voie lactée à l'œil nu, on regarde toujours dans le plan du disque de notre galaxie, c'est-à-dire au sein même de sa structure spiralée. Mais, selon la saison et la direction du regard, on ne contemple pas le même secteur : parfois le centre galactique, parfois les régions plus périphériques. En été, on scrute le centre, dans la constellation du Sagittaire, où la bande est plus dense, riche en étoiles et en nuages de poussière. Mais en hiver, la bande lumineuse que l'on voit correspond au bord du disque galactique : on regarde alors en direction de bras spiraux plus lointains, comme ceux de Persée et d'Orion. ■ **Lise Loumé**

BIOLOGIE

La molécule d'ADN peut-elle résister à la crémation ?

André L.

Non, l'ADN ne survit généralement pas à une crémation, qui atteint 800 à 1000 °C : la molécule commence à se dégrader dès 100 °C et est détruite bien avant 800 °C. Dans de rares cas, par exemple si la crémation est incomplète, de minuscules fragments d'ADN peuvent subsister dans des os très denses, comme le fémur ou la partie pétreuse du crâne, ou encore dans les dents, l'émail dentaire étant très résistant à la chaleur. Toutefois, ils sont souvent trop fragmentés ou contaminés pour permettre une identification fiable en laboratoire. ■ **L. L.**

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

« La science peut-elle sauver le climat ? »
(*Sciences et Avenir* n° 945, novembre 2025)

Votre dossier sur le climat est très intéressant, mais j'ai quelques remarques et questions.
- Quelle est la part des Cive (cultures intermédiaires à valeur énergétique) dans les cultures qui sont destinées à la production d'énergie ?
- Les cultures destinées à la production d'énergie hors Cive ne peuvent-elles pas entretenir les mauvaises pratiques agricoles, utilisation de pesticides, d'engrais ? Sont-elles toujours compatibles avec l'agroforesterie ?
- Vous dites que le végétal brûlé émet du CO_2 qui est immédiatement absorbé par les autres plantes, mais avec les mégafeux ce principe sera-t-il toujours vrai ? Je pense tout particulièrement à l'année 2023 avec 8,6 milliards tonnes de CO_2 émis. **Pascal Villain**

S. et A. : Les Cive sont aujourd'hui très marginales et ne devraient se développer que dans les prochaines années, à condition que les agriculteurs s'approprient cette technique qui leur prend du temps. Les accords passés par TotalÉnergies sont des points de départ.
- Les biocarburants de première génération (issus des cultures) sont condamnés à court terme (2030 selon le règlement européen), en partie à cause d'un bilan carbone peu positif, mais surtout parce qu'ils entrent en concurrence avec la production alimentaire. La deuxième génération utilise des déchets de biomasse. Elle est encore très onéreuse.
- Les mégafeux ne sont pris en compte dans les bilans (notamment du Global carbon project) que depuis 2023. Cette année-là, effectivement, les incendies au Canada et en Russie ont généré des émissions qui affaiblissent le puits terrestre.

Vie extraterrestre

Dans votre dossier du n° 944 où vous explorez les indices pouvant apporter des éléments de preuve d'une vie extraterrestre, vous mettez l'accent sur la recherche de biosignatures. Cette approche est sans doute plus prometteuse que la recherche des seuls signaux radio qui se limite à la possible découverte d'intelligences ayant développé une technologie similaire à la nôtre, ce qui paraît quelque peu anthropocentré… Qu'en est-il de l'hypothèse d'une possible origine extraterrestre des ovnis ou PAN (phénomènes aérospatiaux non identifiés), qu'on ne peut vraiment plus ignorer, en particulier depuis l'officialisation par le Pentagone d'incursions problématiques ? On est manifestement très en retard, en France, sur la prise en compte de ce phénomène, en dépit des travaux intéressants du Gepan (Groupe d'études des phénomènes aérospatiaux non identifiés), dont personne ne parle. **François Thioly**

S. et A. : Ce dossier était consacré aux biosignatures, les traces chimiques et physiques d'une possible biologie extraterrestre, devenues prépondérantes depuis une vingtaine d'années dans les recherches d'une vie ailleurs. L'étude des PAN a fait l'objet d'un long article dans nos colonnes en février 2024 : « Ovnis : la Nasa va mener l'enquête » (*S. et A.* n° 924).

Précision

Dans l'article « Coup de chaud sur le vignoble bordelais » (S. et A. n° 946), il fallait lire que le raisin se charge en sucre, et non en alcool, lorsqu'il est encore sur cep. L'alcool n'est produit qu'au cours de la maturation.

LE CIEL DE FÉVRIER

PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

MERCURE
La petite planète atteint sa plus grande distance angulaire (18°) à l'est du Soleil le 19. Elle est observable en soirée pendant une dizaine de jours autour du 20, très basse sur l'horizon ouest. Cette fenêtre constitue la meilleure occasion d'observer Mercure en soirée en France en 2026.

VÉNUS
Un mois après son passage en conjonction supérieure avec l'astre du jour, l'étoile du Berger réapparaît très timidement en toute fin de mois, dans les lueurs du crépuscule, peu après le coucher du Soleil.

MARS
Trop proche de la direction de notre étoile et peu brillante actuellement, la planète Rouge n'est pas visible.

JUPITER
La plus grosse des planètes se trouve toujours dans d'excellentes conditions d'observation. Très brillante, elle est visible dès la tombée de la nuit vers l'est, gagne rapidement de la hauteur et culmine très haut vers le sud en première moitié de nuit. Elle se couche à l'approche de l'aube.

SATURNE
Observable en début de soirée, la planète aux anneaux se couche de plus en plus tôt : sa fenêtre d'observation se réduit progressivement. En fin de mois, elle n'est visible que peu de temps après le coucher du Soleil.

Positions apparentes de Mercure et de Saturne, 45 minutes après le coucher du Soleil, les 10, 15, 20 et 25 février.

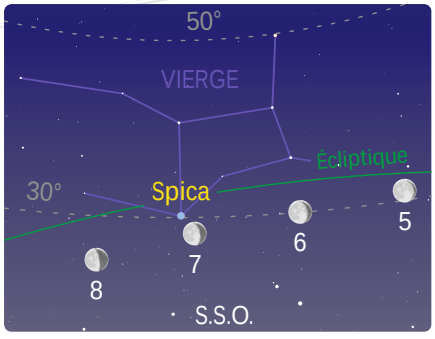
Deux planètes au crépuscule

MERCURE ET SATURNE se repèrent en soirée, bas sur l'horizon ouest. Saturne s'abaisse au fil des jours : encore relativement haute le 10, elle descend inexorablement, raccourcissant chaque soir la durée pendant laquelle elle reste observable. Mercure, plus mobile, s'élève d'abord au-dessus de l'horizon, avec une visibilité optimale vers le 20, avant d'amorcer sa descente. Son éclat décroît en parallèle, rendant son repérage plus délicat.

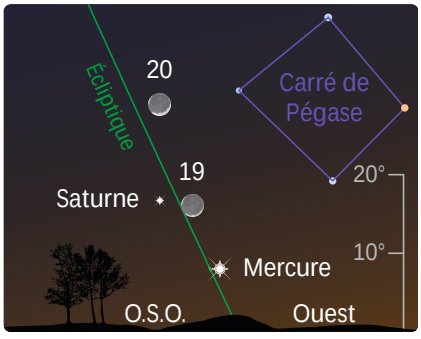
Notre conseil Un horizon ouest parfaitement dégagé est indispensable. Commencez l'observation dès que le ciel s'assombrit, car les deux planètes disparaissent vite.

L'appli du mois

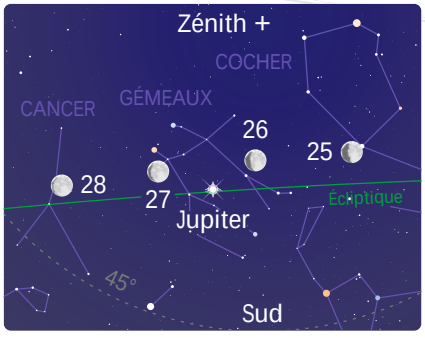
LUNA SOLCAL
est une application gratuite sur Android et payante sur iOS (4,99 €), dédiée au calcul des phénomènes solaires et lunaires. Elle fournit, pour une date et un lieu donnés, les heures de lever et de coucher du Soleil et de la Lune, le midi solaire, les différents crépuscules, ainsi que les dates des prochaines nouvelles et pleines lunes.



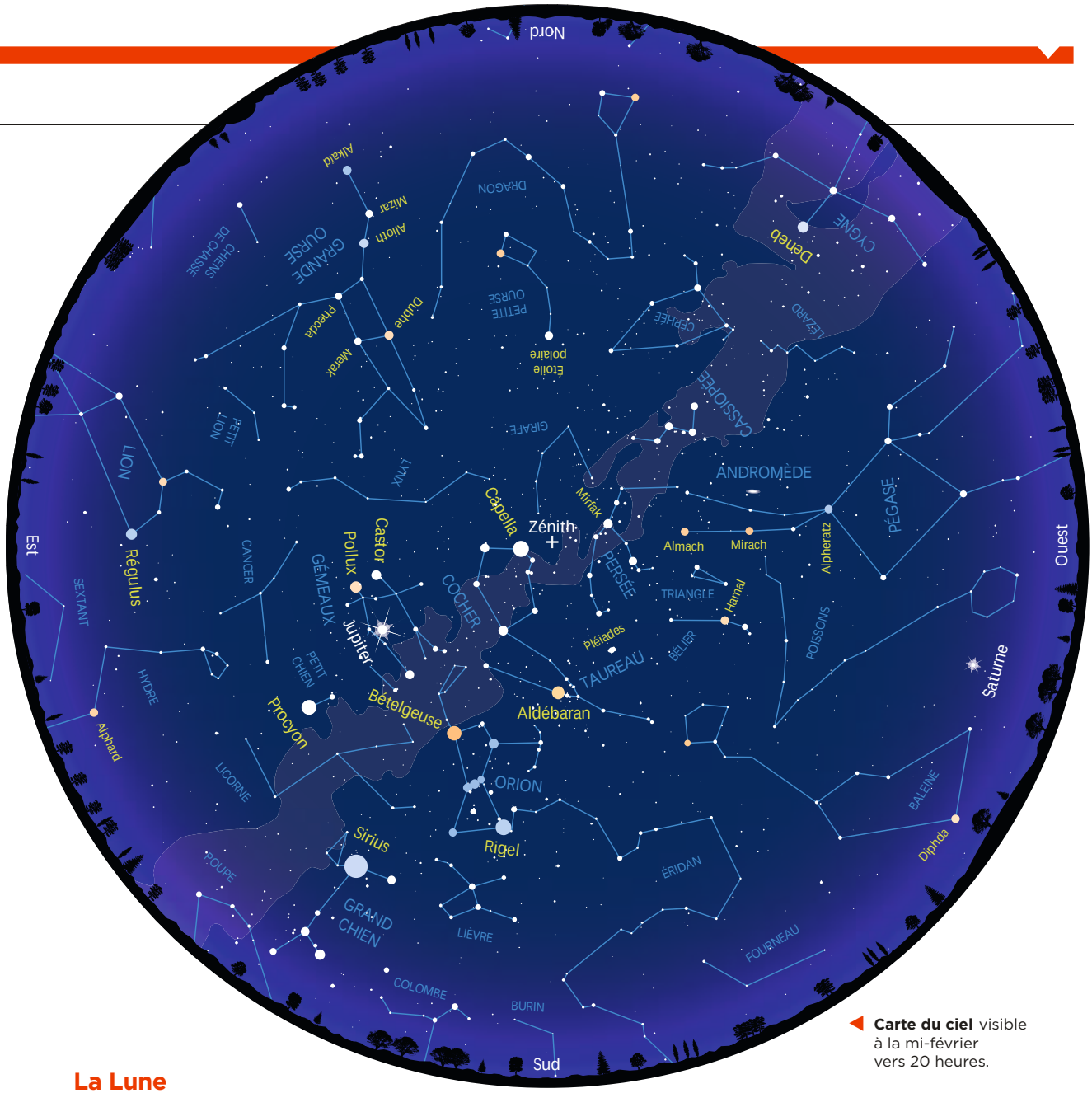
LE MATIN DU 7, 2 H AVANT LE LEVER DU SOLEIL, la Lune gibbeuse sera à moins de 3° de Spica, l'étoile la plus lumineuse de la belle constellation de la Vierge.



LE SOIR DU 19, 45 MINUTES APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, tentez l'observation du fin croissant lunaire, de Saturne et de Mercure. Une paire de jumelles peut vous y aider.



EN FIN DE MOIS, VERS 21 HEURES, notre satellite en phase gibbeuse croissante monte très haut dans le ciel et rejoint Jupiter les 26 et 27, dans la direction du sud.



◀ **Carte du ciel** visible à la mi-février vers 20 heures.

La Lune

Pleine Lune :
dimanche 1er à 23 h (la Lune se trouve alors dans la constellation du Cancer)

Dernier quartier :
lundi 9 à 14 h (Balance)

Nouvelle Lune :
mardi 17 à 13 h (Verseau)

Premier quartier :
mardi 24 à 13 h (Taureau)

Le Soleil

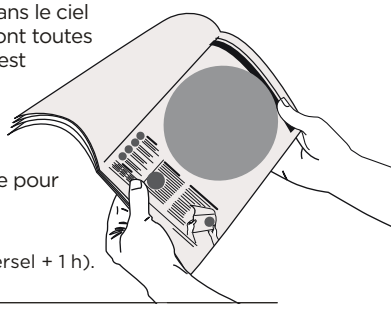
(à Paris)	Lever	Coucher
1er février	**8 h 22**	**17 h 47**
28 février	**7 h 36**	**18 h 31**

D'où voir le ciel

Notre carte tracée pour une latitude de 47° nord montre le ciel visible en France métropolitaine, et plus largement en Europe et dans le monde, à l'intérieur d'une bande s'étendant de 40 à 54° de latitude nord. Si vous êtes au nord du 47e parallèle, l'étoile Polaire sera plus haute dans votre ciel et plus basse dans le cas contraire.

Comment utiliser cette carte

Faites tourner votre magazine sur lui-même, de façon que le nom de la direction dans laquelle vous observez soit écrit à l'endroit. Les constellations et les étoiles que vous retrouverez dans le ciel qui vous fait face sont toutes celles dont le nom est lisible sans trop pencher la tête. La position des planètes visibles à l'œil nu est indiquée pour le 15 du mois.



Les heures sont données en heure légale française (temps universel + 1 h).

Suivez-nous au quotidien sur le Web

www.sciencesetavenir.fr

MUSÉE

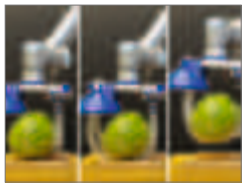
Les trésors cachés du centre Louis-Lortet

MAXPPP

Momies animales, fossiles, insectes… Plus de 3 millions de spécimens sont stockés et étudiés au centre de conservation et d'étude Louis-Lortet, à Lyon, qui abrite une large partie des réserves du musée des Confluences. Visite exclusive au cœur des archives en vidéo. **sciav.fr/948lortet**

ROBOTIQUE

Un robot préhensile inspiré des plantes grimpantes



K. BARHYDT ET AL.S.

Des ingénieurs américains ont mis au point un prototype de bras souples actionnés par de l'air sous pression. Par leur forme en U, les tubes permettent de soulever des charges lourdes, ou des patients dans un cadre médical. Démonstration vidéo. **sciav.fr/948robot**

Le top 5 du mois

- **La liste noire 2026 des médicaments à éviter** sciav.fr/948liste
- **Sur le mur d'Hadrien, les soldats romains étaient envahis par des parasites** sciav.fr/948vindo
- **Expédition virtuelle sur le chantier de la Grande Pyramide** sciav.fr/948pyramide
- **6 règles d'or pour se fabriquer de nouveaux neurones** sciav.fr/948neurones
- **Le loup : le comprendre pour mieux vivre avec** sciav.fr/948loup

SEEHAPTIC

REPORTAGE

Un « braille spatial » pour les malvoyants

La start-up SeeHaptic, membre du campus Louis-Braille, s'est donné un défi un peu fou : faire ressentir l'espace à des personnes malvoyantes. Le dispositif présenté début janvier au CES, le salon de l'électronique de Las Vegas (États-Unis), repose sur une paire de lunettes équipée de caméras qui captent l'environnement. Une intelligence artificielle traduit ensuite les images en fines impulsions appliquées dans le dos du malvoyant, comme une sorte de braille. Reportage vidéo à l'Institut national des jeunes aveugles (Inja), à Paris. **sciav.fr/948haptic**

LES SUJETS QUI VOUS FONT RÉAGIR

SUR LES RÉSEAUX SOCIAUX

AFP

AFP

SIPA

LinkedIn

À faible dose, la prise d'aspirine diminue le risque que le cancer se répande en métastases, et celui d'en mourir. Si cet état de fait est connu depuis 2010 environ, personne ne savait l'expliquer… jusqu'à aujourd'hui ! **sciav.fr/948aspirin**

Instagram

Une perturbation du microbiote pourrait être impliquée dans le déclenchement des maladies inflammatoires chroniques de l'intestin, dont fait partie la maladie de Crohn. C'est la conclusion d'une étude internationale. **sciav.fr/948microbiote**

Facebook

Aujourd'hui, les *data centers* représentent 10 TWh de consommation électrique en France, l'équivalent de celle de 2,5 millions de foyers. Si les tendances se poursuivent, ce chiffre va quadrupler d'ici à 2035. **sciav.fr/948datacent**

LABORATOIRES
ILAPHARM
ilapharm.com

Des solutions santé naturelle adaptées pour vous !

"Les produits des Laboratoires ILAPHARM me conviennent tout à fait, ils sont efficaces."
Avis vérifiés Juin 2025 - Rita M. ★★★★★

OFFRE DÉCOUVERTE
TOUT À 7€*

**Offre valable 2 mois, 1 seule fois, réservée aux nouveaux clients. Non cumulable avec d'autres offres promotionnelles en cours.*

Retrouvez, sur le bon de commande, la quantité recommandée par nos experts pour une efficacité optimale de nos produits !

ARTICULATIONS
- Mobilité plus aisée
- Souplesse et confort articulaire
- 100% Harpagophytum *(1)*

45 gélules
Durée : 15 jours

OS & ARTICULATIONS
- Constituant naturel des muscles, os et cartilages
- Formation du collagène

500 ml
Durée : 20 jours
~~23,60€~~

JAMBES LOURDES
- Active la circulation sanguine
- Légèreté et confort des jambes

45 gélules
Durée : 15 jours

CAPITAL-VISION
- Préserve la vision au quotidien
- Bonne clarté visuelle *(11)*

10 ampoules
Durée : 10 jours
~~20,50€~~

LIBIDO
- Source d'énergie
- Aphrodisiaque
- Stimule le désir sexuel
- Idéal avec le Safran BIO !

45 comprimés
Durée : 15 jours

SEXUALITÉ
- Stimule l'érection
- Forte concentration en actifs (crocines)
- Idéal avec la Maca BIO ! *(8)*

20 gélules
Durée : 10 jours

VIDER SA VESSIE
- Envies intempestives d'uriner
- Efficacité prouvée dès 4 semaines

45 gélules
Durée : 15 jours

PROSTATE
- Confort urinaire
- En cas de mauvais débit urinaire
- Prostate et vessie

45 capsules
Durée : 22 jours

SOMMEIL
- Calme et apaise
- Sommeil de qualité
- Ni accoutumance, ni somnolence

45 gélules
Durée : 22 jours

CHOLESTÉROL
- Régulation du cholestérol
- Bonne santé cardiovasculaire *(9), (10)*

30 gélules
Durée : 10 jours

MINCEUR
- Brûle-graisse naturel
- Besoin de perdre du poids *(1), (2), (4), (13)*

45 gélules
Durée : 15 jours

GORGE
- Pour une voix douce et claire
- Bienfaits du Miel et de la Gelée Royale
- Idéal toute l'année !

50 g
~~12,00€~~

STRESS
- En cas de stress et fatigue passagère
- Magnésium et B6 : association optimale

Allergène : ***poisson***. *(5)*

45 gélules
Durée : 22 jours

FOIE - DRAINEUR
- Favorise le fonctionnement du foie
- Détoxifie *(4), (6), (7)*

10 ampoules
Durée : 5 jours
~~17,70€~~

IMMUNITÉ
- Défenses naturelles et vitalité
- 100% poudre de Ginseng BIO

45 gélules
Durée : 11 jours

DIGESTION
- Ballonnement et flatulences
- Soulagement rapide *(3), (12)*

45 gélules
Durée : 11 jours

Produits déconseillés aux moins de 18 ans et aux femmes enceintes ou allaitantes. (1) Déconseillé en cas d'ulcère gastrique ou duodénal. (2) Contient de la caféine (50 mg par jour). (3) Déconseillé en cas de d'allergie croisée connue, en particulier à la famille des Apiaceae ou au pollen d'armoise ou à l'anéthole. (4) Déconseillé en cas de troubles de la thyroïde. (5) Ne convient pas aux insuffisants rénaux. (6) Ne pas consommer en cas de maladie des voies biliaires et hépatiques. (7) Déconseillé en cas d'allergie aux Asteraceae. (8) Ne pas associer avec des antidépresseurs. (9) Ne pas associer avec des anticoagulants. (10) Déconseillé en cas de traitement concomitant par un médicament anti-rétroviral. (11) En cas de troubles digestifs consultez votre médecin avant consommation. (12) Espacez la prise de médicaments de celle de ce produit d'au moins 2h. (13) Déconseillé en cas de troubles cardiaques. Les éventuelles traces d'allergènes sont indiquées sur l'étiquetage des produits. Deux serviettes 100% coton (340 g/m²). Dimensions de la grande serviette : 71 x 122 cm et de la serviette invité : 30 x 30 cm.

VOS CADEAUX

Le Duo de Serviettes

100% COTON

OFFERT
Dès 20€ d'achat

0€ Livraison
Dès 25€ d'achat
Au lieu de ~~6,50€~~

Commandez sur :
ilapharm.com

2ème CADEAU OFFERT
Dès 30€ d'achat

COMMANDEZ SUR :
ilapharm.com
ou avec votre smartphone

CODE PRIVILÈGE :
CB591

OFFRE DÉCOUVERTE - SANS ENGAGEMENT

POUR COMMANDER :

@ ilapharm.com
Possibilité de régler par chèque

ILAPHARM
chez DIMOLOG
ZA de la Touche Tizon
8, rue René Panhard - 35230
NOYAL - CHÂTILLON-SUR-SEICHE

01 49 09 11 11
Du lundi au vendredi
9h -13h et 14h -18h

COORDONNÉES ☐ Mme ☐ Mr

Nom, Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code Postal : |_|_|_|_|_| Ville : .....

.....

Tél. : ..... Date d'anniversaire : |_|_| |_|_| |_|_|_|_|

E-mail : .....

Pour recevoir les **Offres mails de nos partenaires** ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

MODE DE PAIEMENT

☐ **Par carte bancaire (débit immédiat uniquement) :**

N° |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Date d'expiration : |_|_| |_|_|

Chiffres inscrits au dos de ma carte : |_|_|_|

Signature :

☐ **Par chèque, je choisis :**
○ débit immédiat
○ débit dans 1 mois à l'ordre des Laboratoires ILAPHARM

GARANTIES

SATISFAIT OU REMBOURSÉ GARANTIE 1 MOIS

PAYEZ DANS 1 MOIS
Envoyez votre **règlement par chèque, avec votre bon de commande**, il ne sera encaissé que dans 1 mois.

Charte Qualité fevad · synadiet · La Poste 72h

Quantité RECOMMANDÉE pour une CURE COMPLÈTE

NOM DU PRODUIT	RÉF.		QTÉ	PRIX UNITAIRE	TOTAL
ARTICULATIONS - Harpagophytum BIO	PHAB45	x3		7€	
OS - Silicium Organique et Vitamine C	PSI	x3		7€	
JAMBES LOURDES - Vigne Rouge BIO	PVRB45	x3		7€	
VISION - Myrtille Myrobalan BIO	PXMMB	x3		7€	
LIBIDO - Maca BIO	PMAB45	x3		7€	
SEXUALITÉ - Safran BIO	PSFB20	x3		7€	
VESSIE - Saw Palmetto BIO	PSPB45	x3		7€	
PROSTATE - Huile de Courge BIO	PPCB45	x2		7€	
SOMMEIL - Passiflore BIO	PPAB45	x3		7€	
CHOLESTÉROL - Ail Noir BIO	PANB30	x3		7€	
MINCEUR - Guarana BIO	PGUB45	x3		7€	
GORGE - Perles de Miel et Gelée Royale	PMGR	x2		7€	
STRESS - Magnésium Marin et B6	PMM45	x3		7€	
DRAINEUR - Artichaut - Radis Noir BIO	PXRAB	x3		7€	
IMMUNITÉ - Ginseng Sibérien BIO	PGSB45	x3		7€	
DIGESTION - Charbon Fenouil BIO	PCFB45	x3		7€	
☐ Ma commande atteint 20€, je reçois mon **DUO DE SERVIETTES**					OFFERT
☐ Ma commande atteint 25€, **j'économise 6,50€ sur la livraison**					OFFERTE
☐ Ma commande est inférieure à 25€, **je rajoute 6,50€ de livraison**					
Code Privilège : **CB591**				**TOTAL À RÉGLER**	.....€

Laboratoires ILAPHARM SAS au capital de 38112 €, RCS Nanterre B 384 620 878 - 27 rue de Solférino - 92100 Boulogne. Offre et frais de livraison valables en France Métropolitaine. En cas d'indisponibilité du cadeau, il sera remplacé par un autre d'une valeur similaire. Photos non contractuelles. Pour exercer les droits du Règlement européen sur la protection des données, écrivez-nous ou voir nos C.G.V sur notre site ilapharm.com/condition-generales-de-vente. Vous bénéficiez des dispositions de la garantie légale de non-conformité et des vices cachés (détails articles L.217-4 et suivants du Code de la consommation). Délai de rétractation : 30 jours après livraison de votre commande, pour retourner les produits pour remboursement ou échange sans pénalités, sauf frais de retour. Traitement de la commande : 48h suivant sa réception, livraison après 72h d'acheminement environ. Nous adhérons à la fédération du e-commerce et de la vente à distance (FEVAD) et au service de médiation du e-commerce (BP 20015 - 75362 Paris Cedex 8 mediateurduecommerce@fevad.com). ADEME emballages et papiers : FR202486_01JWKA, Pour votre santé, mangez au moins 5 fruits et légumes par jour, www.mangerbouger.fr. Cochez la case, pour ne pas recevoir nos offres ☐, celles de nos partenaires ☐, ou écrivez-nous.

Nouveau T-Roc. Partez confiant.

Projecteurs LED dynamiques et intelligents
'IQ Light Matrix Led'.*

A
B
C 130 g CO_2/km
D
E
F
G

Modèle présenté : Nouveau T-Roc R-Line 1.5 eTSI Hybrid avec options pack design 'Black', jantes 'Calgary' 20", couleur 'Jaune Canary' toit noir. Plus d'informations sur volkswagen.fr *En option selon les finitions.
Les technologies d'aide à la conduite ne dispensent pas le conducteur d'être vigilant.

**Cycles mixtes du Nouveau T-Roc R-Line (l/100 km) WLTP : 5,7. Rejets de CO_2 (g/km) WLTP : 130.
Valeurs au 01/09/2025, susceptibles d'évolution. Plus d'informations auprès de votre Partenaire.**

SAS Volkswagen Group France, RCS Soissons 832 277 370.

Pour les trajets courts, privilégiez la marche ou le vélo #SeDéplacerMoinsPolluer